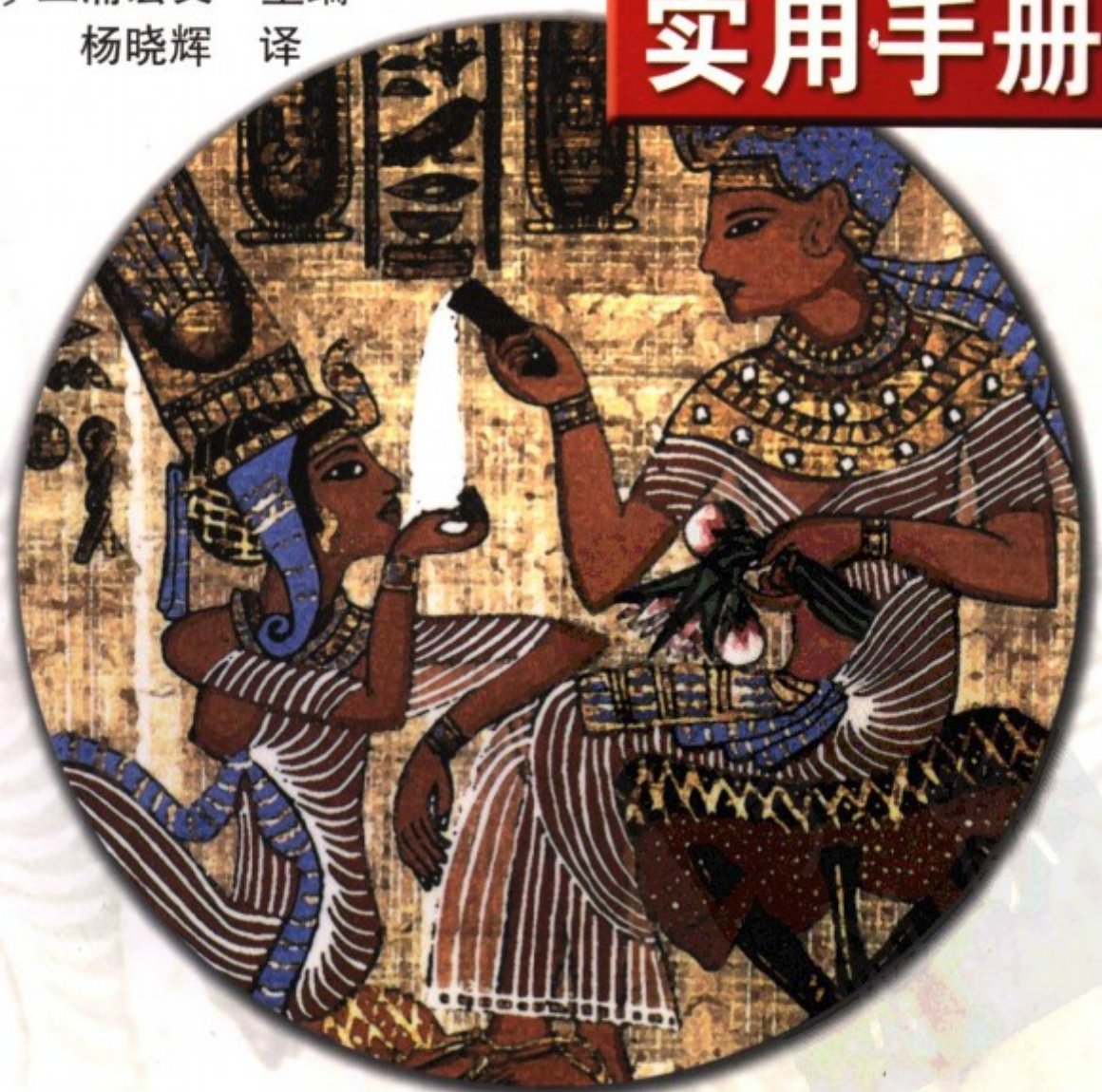
Technology 实用技术

OHM handbook 第二版

机电一体化

实用手册

〔日〕三浦宏文 主编
杨晓辉 译



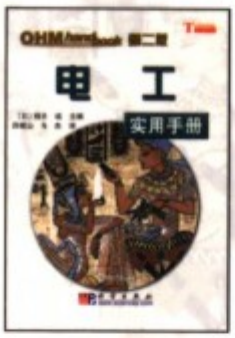
科学出版社
www.sciencep.com

(TH-0209.0101)
责任编辑　刘红梅　崔炳哲
责任制作　魏　谨
封面设计　李　力

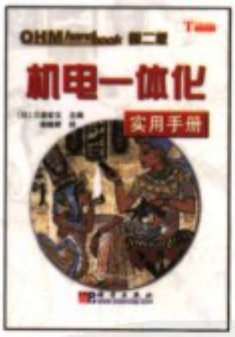
Technology
实用技术

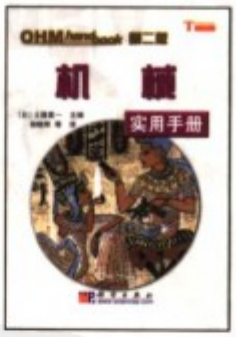
丛书特点

★ 方便选择学习	各章内容相对独立，可根据需要选择学习
★ 提高学习效率	板块式的编写方式，有利于提高学习效率
★ 满足不同要求	系统性强，从基础知识到应用技术
★ 版 式 新 颖	重点名词标注在正文左侧，便于查找。书末给出索引
★ 便 于 学 习	丰富、易懂的图表，快速掌握相关内容









ISBN 978-7-03-017984-5
9 787030 179845 >

建议上架类别：工业技术／机电一体化

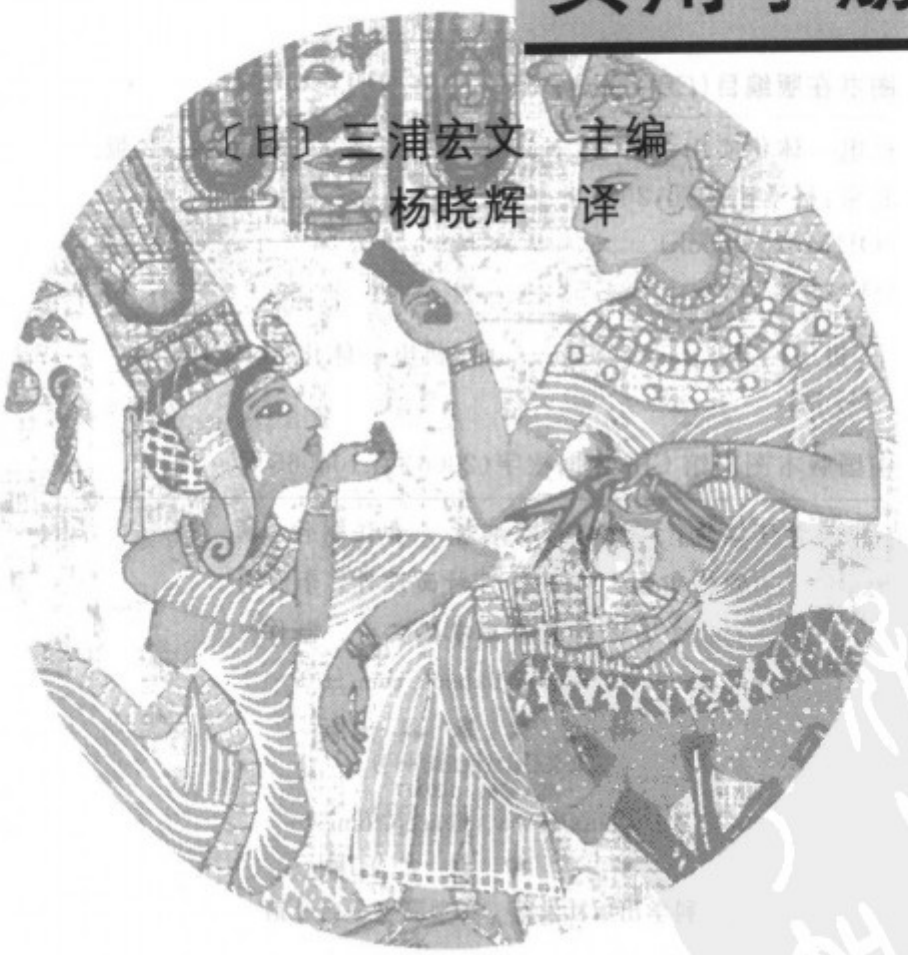
科学出版社 东方科龙
http://www.okbook.com.cn
cuibingzhe@mail.sciencep.com

定　价: 42.00 元

OHM handbook 第二版

机电一体化

实用手册



〔日〕三浦宏文 主编
杨晓辉 译

科学出版社
北京

图字：01-2006-2188 号

内 容 简 介

本书为“OHM handbook”系列之一。该系列共 4 册，分别对电工、电子、机械及机电一体化等专业领域的基础理论知识、典型应用及最新发展动态进行介绍。本系列特点是内容丰富但精练，重点突出，插图丰富，有重点名词提示，并在书末附有中文索引。

本书共 10 章 126 节，主要以机器人为主线来介绍机电一体化技术，主要内容包括机电一体化的基础知识、机械零件与机构、传感器技术、执行装置技术、计算机技术、机械电子系统控制技术，以及机器人技术、机电一体化的实践和机器人竞赛等。为便于读者理解，书中引用约 640 幅插图，内容循序渐进，叙述精练，易读易懂。

本书既可以作为机电一体化的实用工具书，也可以作为机器人的入门书，同时也是机器人竞赛参考书。读者对象主要为从事或学习机电一体化和机器人技术的读者即企事业单位的科研、技术人员，以及大专院校的师生。

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化实用手册 /（日）三浦宏文主编；杨晓辉译. —2 版. —北京：科学出版社，2007

(OHM handbook)

ISBN 978-7-03-017984-5

Ⅰ. 机… Ⅱ. ①三…②杨… Ⅲ. 机电一体化-技术手册 Ⅳ. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 104065 号

责任编辑：刘红梅 崔炳哲 / 责任制作：魏 谨

责任印制：刘士平 / 封面设计：李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

http://www.okbook.com.cn

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 8 月第 一 版 开本：A5(890×1240)

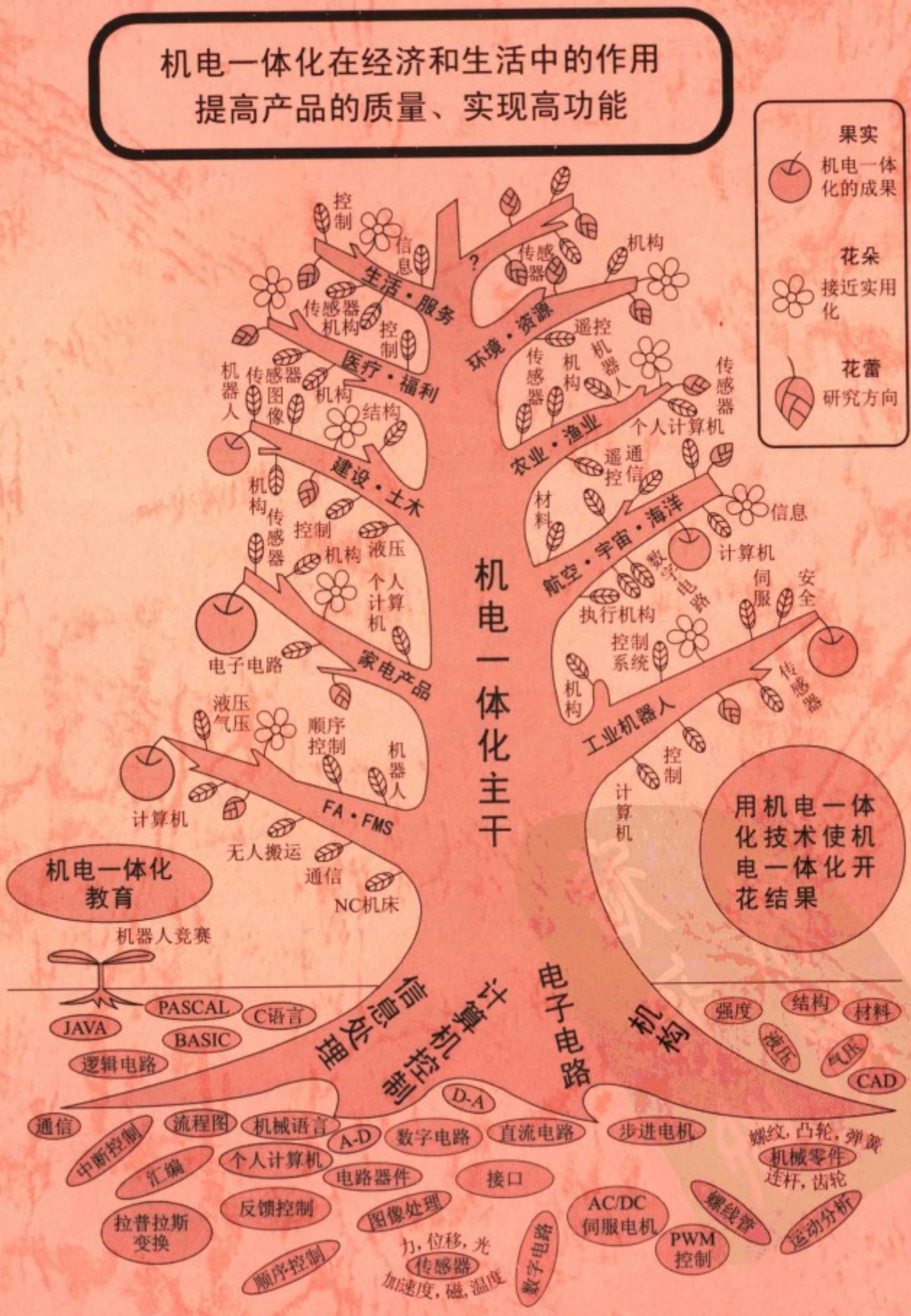
2007 年 1 月第 二 版 印张：18 1/2

2007 年 1 月第七次印刷 字数：461 000

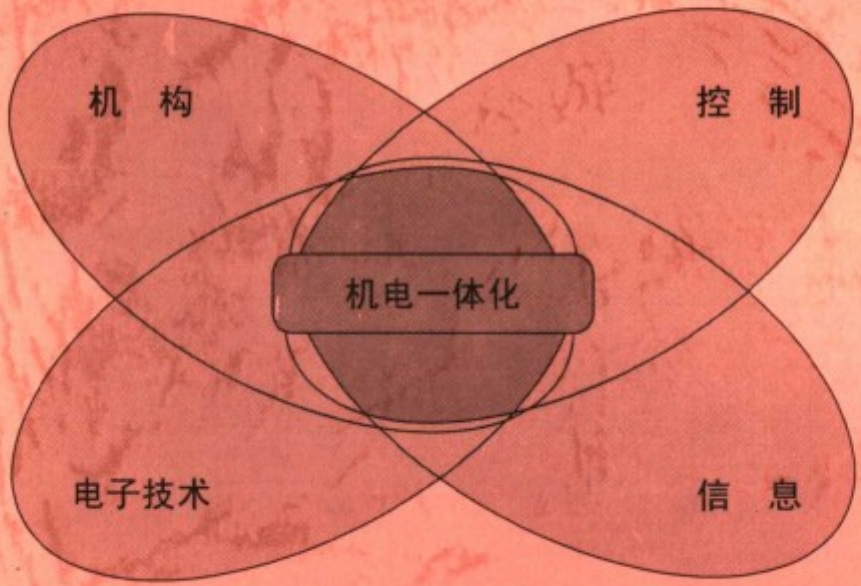
印数：21 001—26 000

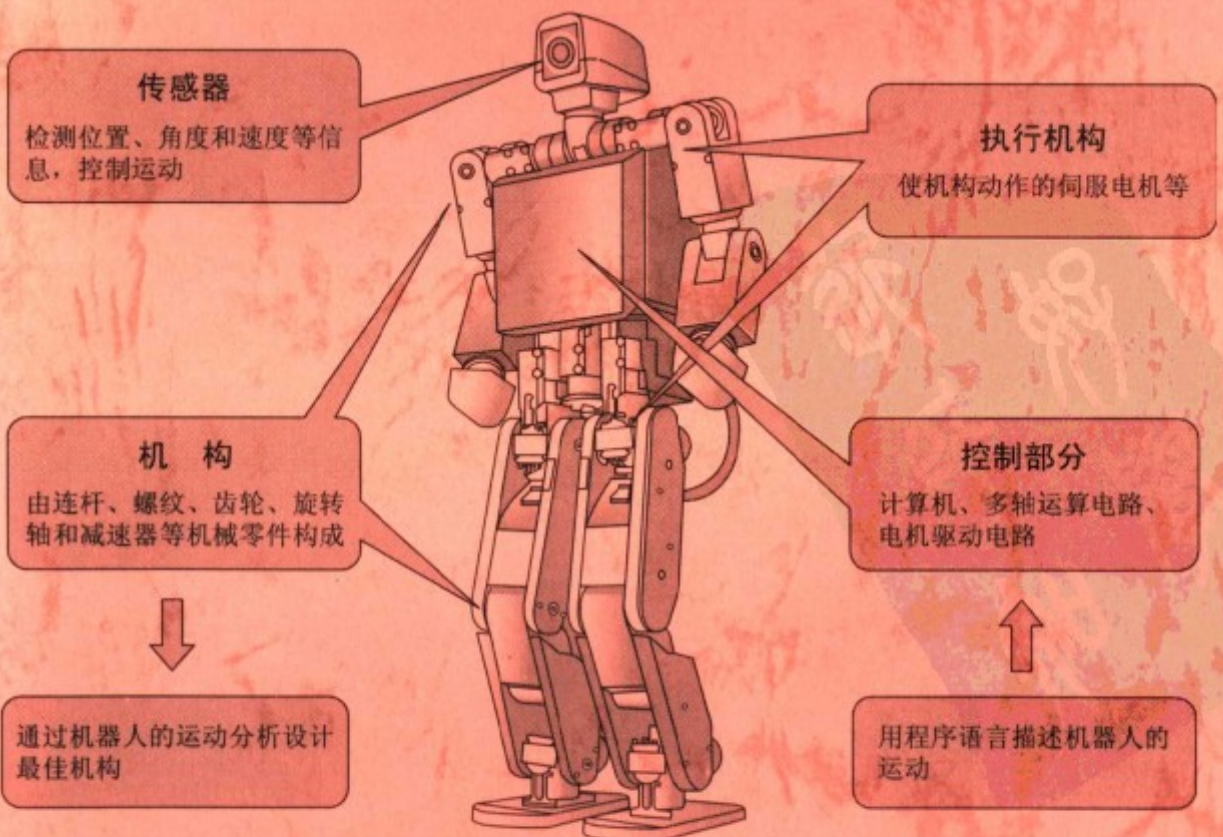
定 价：42.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉）

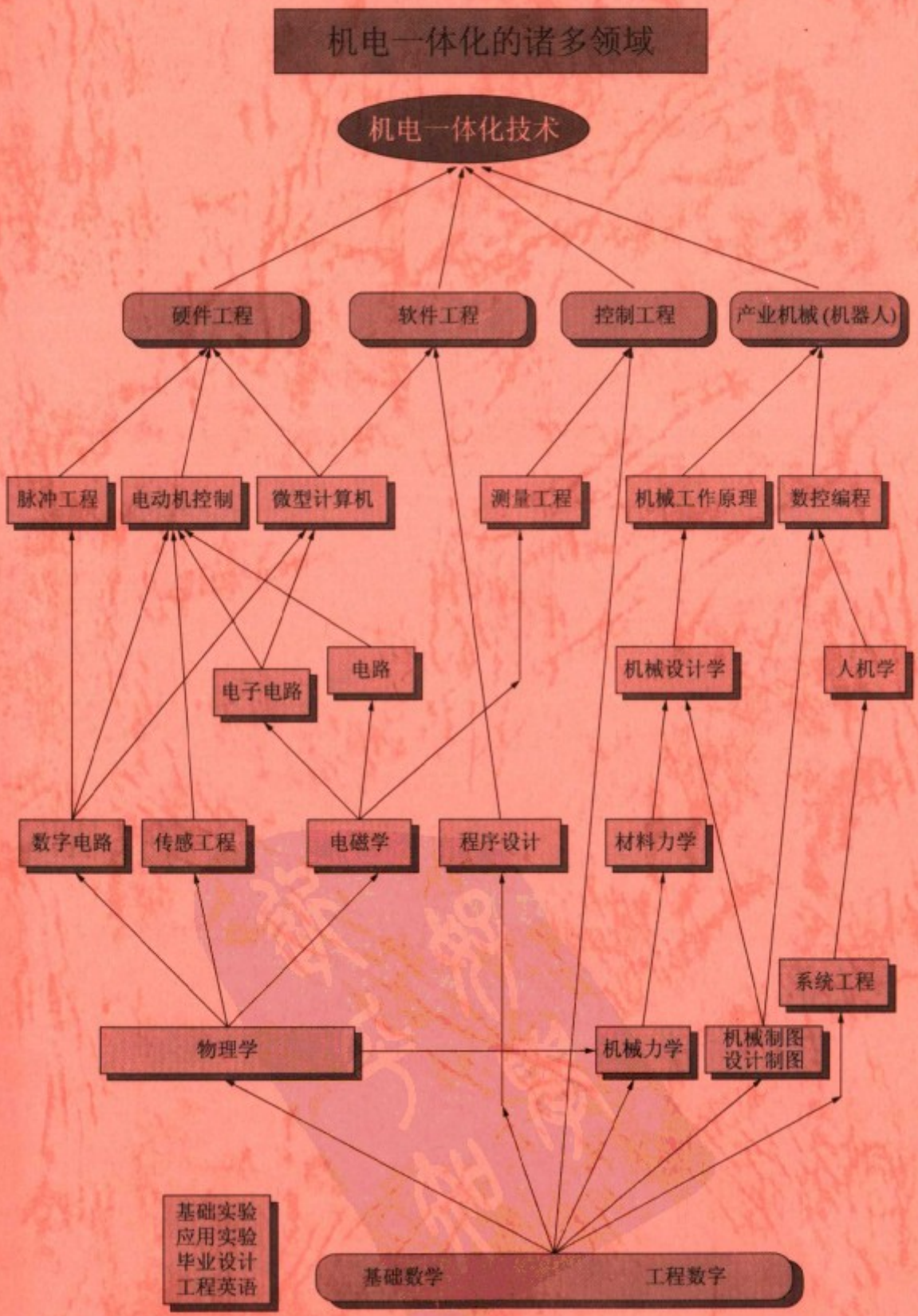

机电一体化在经济和生活中的作用
提高产品的质量、实现高功能
果实
机电一体化的成果
花朵
接近实用化
花蕾
研究方向
机电一体化主干
生活·服务
环境·资源
医疗·福利
农业·渔业
建设·土木
航空·宇宙·海洋
家电产品
工业机器人
FA·FMS
控制
信息
传感器
机构
遥控
机器人
个人计算机
通信
材料
液压
电子电路
计算机
数字电路
伺服
安全
执行机构
控制系统
顺序控制
无人搬运
NC机床
机器人
液压气压
结构
图像
用机电一体化技术使机电一体化开花结果
机电一体化教育
机器人竞赛
PASCAL
C语言
JAVA
BASIC
逻辑电路
通信
流程图
机械语言
中断控制
汇编
个人计算机
反馈控制
拉普拉斯变换
顺序控制
A-D
D-A
数字电路
直流电路
电路器件
接口
图像处理
力，位移，光
传感器
加速度，磁，温度
数字电路
步进电机
AC/DC伺服电机
PWM控制
螺线管
运动分析
强度
结构
材料
液压
气压
CAD
螺纹，凸轮，弹簧
机械零件
连杆，齿轮
信息处理
计算机控制
电子电路
机构

机电一体化在机器人中的应用





学　科	课程名称	主要课程内容
机械学科	物理学	普通物理、力学、振动、波动、声学、光学
	机械力学	力、静力学、动力学、力矩、摩擦、机械零件、转动、振动分析
	机械材料	合金、钢铁、热处理、防腐与不锈钢、非金属材料、铸铁
	机械设计	材料强度、设计及计算、标准、公差与配合、连接件、螺栓、键、花键、销、开口销、铆钉、轴、焊接、离合器、带、齿轮、制动器、弹簧
	机械加工	铸铁、塑性加工、焊接、机床、自动机床
	机械制图	第三角投影法、JIS 数据的用法、制图方法
	设计制图	根据给定的条件进行机械部分设计，装配图、零件图设计
	工业机械	各种机床、生产机械、搬运机械(液压、气动执行装置)、机器人的种类与结构、驱动及控制、操作技术
电气学科	数字电路	逻辑代数、组合电路、计数器、寄存器逻辑设计、数字集成电路
	传感器技术	各种传感器(温度、光、磁、压力、超声波、气体、化学、位置、加速度)、传感器电路
	电磁学	静电场、静电容、磁场、电磁力、电流与磁场
	电路	直流电路、交流电路、谐波电路、电磁感应、电力
	模拟电路	晶体管、放大器、振荡电路、电源电路、FET、OP 放大器
	测试技术	电磁检测、电子仪器、电量转换
	电机与控制	直流电机、交流伺服、步进电机、电磁铁控制电路
	硬件技术	微机系统设计、接口技术、I/O 接口、D/A 与 A/D 转换、中断处理
	微机原理	微机基本结构与原理、Z80MPU 的汇编语言
信息学科	语序设计	C 语言编程
	数控编程	NC 机床、加工中心等的数控编程
	软件工程	控制系统、模块化编程
控制学科	系统工程	系统规划、优化方法、仿真与建模、可靠性
	控制工程	线性系统、传递函数、框图、过渡响应、频率响应、稳定性、反馈控制、顺序控制
	人机工程	人机系统、人体构造与特征、人机界面与人体关系、显示器、操作器、可靠性、设计及形状、尺寸、重量、信息速度和形式


机电一体化的诸多领域
机电一体化技术
硬件工程
软件工程
控制工程
产业机械(机器人)
脉冲工程
电动机控制
微型计算机
测量工程
机械工作原理
数控编程
电子电路
电路
机械设计学
人机学
数字电路
传感工程
电磁学
程序设计
材料力学
系统工程
物理学
机械力学
机械制图
设计制图
基础实验
应用实验
毕业设计
工程英语
基础数学
工程数字

译者的话

机电一体化是涉及机械、电工、电子、控制、信息和计算机等多学科的综合技术。其中的许多技术都属于前沿学科，如信息和计算机技术等，所以是发展最快的技术之一。

由于构成机电一体化的主要技术发展迅猛，《机电一体化实用手册》的第二版与第一版相比改动很大。特别是从第6章的计算机技术到最后第10章的“机器人竞赛大会”，内容几乎是全新的，这个全新也包括所介绍的技术本身是最新技术。

机器人是典型的机电一体化产品，所以本书是以机器人为主线来介绍机电一体化技术的。书中的内容包括设计机器人所需要的各种知识和机器人的制造、调试、应用和发展等，并且在最后还用一章的篇幅专门介绍在日本国内举办的各种机器人竞赛，完全可以作为机器人的入门书。从基础和原理开始介绍机器人的书还比较少，所以本书应是一本兼顾机电一体化技术和机器人的好书。

本书的主要特点是内容丰富、循序渐进、叙述精练、图文并茂、易读易学，书中引用的大量实例紧密结合实际，具有很高的参考价值。虽然本书是从机电一体化的基础知识开始讲解，但限于篇幅，许多知识是介绍性的，需要读者自己去拓展，本书只是起到穿针引线的作用。本书可作为教学参考书和从事机电一体化工作实践的工具书。读者应具有中等以上的技术水平。

本书由白彦华翻译第1章、第2章；孙学雁翻译第3章；李润霞翻译第6章；孙海军翻译第7章；杨晓辉翻译第4章、第5章、第8章、第9章、第10章，并校订全稿。由于译者水平有限，难免有错误和纰漏，敬请广大读者批评指正。

译　者

主编的话

机电一体化技术，是机械技术与电子技术相融合的产物。在计算机控制技术的带动下，可以认为机电一体化技术是能够将机械智能化的梦想无限发展的技术。

大约是在10年前的1996年出版发行了本书的第一版。在这10年中，技术的进步令人惊诧不已。当时，我正在研究的课题之一是微型机器人，也与属于国家计划的微型机械有关，是当时推动“微技术”发展的重要技术。如今，以更小的尺度为研究对象的“纳米”技术，已经进入到应用阶段。

信息技术的发展也在改变着我们的生活，便携式电话的普及就比我们预想的要快。还有最近在各种场合中被广泛使用的网络语言，在10年前几乎就没有听说过。

机电一体化技术在不断地支持这些技术的发展。

机器人与机电一体化技术的关系最为密切。所以，本书将以机器人中使用的所有技术为主线，从基础知识到实际应用的各个领域，通过应用实例以简洁易懂的语言进行详细的解说。

最近，也经常使用RT(Robot Technology)这个词语。它是指将传感器、执行装置和计算机等技术有机结合，为实现某种目的的自动机械系统，也可以叫做全部机器人系统。

今后，在不断发展的机器人社会，将会经常看到人与机器人合作、共同生活的场面。如果真是如此，那么，以后就要对机电一体化技术的安全性和可靠性等方面提出更高的要求。

希望本书能够对喜欢和从事机电一体化技术的读者们有较大的帮助。

三浦宏文

有关本书的说明

本书的构成

(1) 全书由 10 章 126 节构成。各节内容相对独立，均可独立作为手册使用。因此，不管从哪一节开始阅读都能很好地理解所讲内容。

(2) 各节按【要点】、【解释】的顺序通俗易懂地讲解要点，必要之处还设置了【相关知识】。

【要　　点】 在每一节的前头，对该节题目的结论进行概要性的叙述。

【解　　释】 设置了一系列醒目的小标题(带有□记号的标题)，对【要点】的内容进行详细的说明。

【相关知识】 对与本节题目相关的事项和关键词进行扼要的说明。

(3) 为了在短时间内了解每一节的内容，只要读懂【要点】，就可以迅速理解并掌握该节的知识。

(4) 根据需要，设置了【例题】和【篇外话】。

【例题】为了帮助理解，设置了易懂的例题。

【篇外话】以有兴趣的相关话题或实际应用的装置等为例，介绍尖端技术等的话题。

(5) 在本书的正文前后给出了能够了解机电一体化全貌的图和表。因此，根据本书各章节的题目就可知道它在机电一体化中的地位。

图、表的使用方法

(1) 为有助于理解内容，书中安排了约640幅插图和表格。在图中还适当地加入了简单易懂的说明。

(2) 如果技术人员能够将书中的图例摘抄到笔记本上，并经常翻阅，在阅读资料时就会发现它能起到很大的作用。

关键词的查询

(1) 文中的重要名词，用黑体字书写在每页的左侧。

(2) 重要名词以索引的形式列在书末，因此本书可当作工具书灵活使用。

机器人竞赛

(1) 为了引起读者对机电一体化技术的亲切感和兴趣，在本书的第10章中介绍了参加各种“机器人竞赛大会”的经验和体会。

(2) 希望全国的同龄学生能够关心并积极参加所在学校和地区举办的竞赛活动。

编纂委员会

主　　编

三浦宏文(工学院大学校长)

编纂委员

渡边嘉二郎(政法大学)
大垣　博　(神奈川县立神奈川工业高等学校)
久慈俊夫　(东京都立产业技术研究所)
小岛昭雄　(东京都立科学技术高等学校)
樱井　诚　(日本工学院八王子专科学校)
中田信明　(埼玉县立大宫工业高等学校)
矢吹隆一郎(埼玉县立浦和工业高等学校)

执笔人员

浅野健一　(R&M Firmware Design)
芦野广巳　(山形县立寒河江工业高等学校)
石川　浩　(日本工学院八王子专科学校)
井藤功久
岩月正见　(政法大学)
大垣　博　(神奈川县立神奈川工业高等学校)
大西典子　(三菱重工业株式会社)
冈村　猛　(埼玉县立大宫工业高等学校)
小川　忍　(神奈川县立神奈川工业高等学校)
加藤典之　(株式会社 TOYO Corporation)
木村久幸　(神奈川县立向之冈工业高等学校)
久慈俊夫　(东京都立产业技术研究所)
光畑幸史　(三菱重工业株式会社)
小岛昭雄　(东京都立科学技术高等学校)
小林一行　(政法大学)
小堀　隆　(东京都立科学技术高等学校)
小柳荣次　(桐荫横滨大学)
佐藤敏幸　(名古屋工学院专科学校)
下笹洋一　(综合警备保障株式会社)
高桥　勉　(埼玉县立新座综合技术高等学校)
津野幸久　(埼玉县立越谷综合技术高等学校)
富崎秀德　(株式会社安川电机)
中田信明　(埼玉县立大宫工业高等学校)
并木明夫　(东京大学)
鸟山和昭　(埼玉县立狭山工业高等学校)
深谷直树　(东京都立航空工业高等专科学校)
福田　守　(日本工学院八王子专科学校)
藤田善弘　(日本电气株式会社)
增田彦四郎(东京都立工业高等专科学校)
松元明弘　(东洋大学)
丸山八雄　(前 JREM 株式会社)
村冈好久　(名古屋工学院专科学校)
村田直史　(三菱重工业株式会社)
矢吹隆一郎(埼玉县立浦和工业高等学校)
渡边嘉二郎(政法大学)

目　录

第1章 机电一体化

1 什么是机电一体化 …… 2
2 机电一体化的作用 …… 4
3 机电一体化系统 …… 6
4 机电一体化的相关技术 …… 8
5 机电一体化技术的展望 …… 11

第2章 机电一体化的基础知识

1 机械基础 …… 14
2 力、功和功率 …… 17
3 材料力学基础 …… 21
4 机械零件基础 …… 30
5 机械制图基础 …… 33
6 反馈控制与顺序控制 …… 44
7 反馈控制系统的构成 …… 47
8 反馈控制系统的特性 …… 51
9 顺序控制基础 …… 55
10 直流电路基础 …… 58
11 磁场与电场基础 …… 61
12 交流电路基础 …… 67
13 电路器件的工作原理 …… 72

CONTENTS

14 逻辑电路的组成 …… 79
15 集成电路 …… 90
16 计算机基础 …… 95
17 流程图的编制 …… 97
18 硬件基础 …… 101
19 软件基础 …… 103
20 数据通信与 LAN/网络基础 …… 107

第3章 机械零件与机构

1 机械运动及坐标系 …… 112
2 螺纹的原理与应用 …… 116
3 弹簧及其作用 …… 122
4 轴和轴承及其工作原理 …… 125
5 直线导轨 …… 133
6 制动器及其作用 …… 136
7 齿轮原理及其分类 …… 138
8 齿轮机构 …… 141
9 柔性传动机构 …… 144
10 连杆机构的相关技术 …… 148
11 凸轮机构的相关技术 …… 152

第4章 传感器技术

1 力传感器 …… 158
2 位移传感器 …… 163
3 位置传感器 …… 168

4 速度传感器 …… 174
5 加速度传感器 …… 180
6 距离传感器 …… 185
7 光敏传感器 …… 190
8 磁敏传感器 …… 196
9 温度传感器 …… 201
10 湿度传感器 …… 206
11 气敏传感器 …… 209
12 化学传感器 …… 212
13 语音识别 …… 215
14 智能传感器 …… 218

第5章 执行装置技术

1 执行装置 …… 222
2 步进电机 …… 225
3 步进电机的励磁方式 …… 227
4 步进电机驱动电路 …… 229
5 步进电机控制电路例 …… 232
6 采用步进电机专用 IC 芯片的控制电路例 …… 234
7 直流电机 …… 239
8 直流电机的启-停控制 …… 241
9 直流电机的线性控制与 PWM 控制 …… 245
10 直流电机的线性控制电路例 …… 247
11 直流电机的 PWM 控制电路例 …… 250
12 直流电机的正转、反转控制电路 …… 254
13 超声波电机 …… 258

14 螺线管的控制电路 …… 260
15 交流伺服驱动 …… 263
16 液压执行装置 …… 266
17 液压执行装置的工作原理 …… 269
18 液压伺服系统 …… 274
19 气动执行装置 …… 278
20 气动执行装置的工作原理 …… 281
21 气动执行装置的控制 …… 287

第6章 计算机技术

1 控制与计算机 …… 294
2 微型计算机的种类 …… 296
3 微型计算机的基本结构 …… 298
4 微型计算机的基本动作 …… 302
5 存储器的功能和种类 …… 306
6 I/O 接口 …… 309
7 PIC 简介 …… 313
8 PIC 16F84A 的构造 …… 315
9 PIC 16F 的指令体系 …… 319
10 PIC 定时器 …… 322
11 PIC 与外部设备的连接 …… 324
12 PIC 的使用例(比赛用机器人的制作) …… 326
13 嵌入软件 …… 333
14 实时处理 …… 336
15 中断机制 …… 338
16 任务管理 …… 340

第7章 机械电子系统控制

1 什么是系统模型 …… 344
2 拉普拉斯变换 …… 347
3 传递函数及其响应 …… 351
4 方框图 …… 355
5 稳态误差 …… 357
6 稳定性 …… 361
7 直流伺服电机 …… 366
8 液压伺服电机的模型 …… 370
9 顺序控制原理 …… 375
10 顺序控制中的逻辑电路 …… 379
11 逻辑电路的简化 …… 382
12 顺序控制例 …… 385

第8章 机器人技术

1 机器人的种类与构造 …… 390
2 机器人的结构分析 …… 395
3 机器人的正运动分析 …… 401
4 机器人的逆运动分析 …… 408
5 机器人的驱动方式与控制 …… 412
6 机器人的操作 …… 417
7 机器人的接口 …… 423
8 机器人的检查 …… 428
9 机器人与安全管理 …… 433
10 未来的机器人 …… 437

第9章 机电一体化的实践

1 X-Y工作台的制作 …… 446
2 下肢功能恢复训练机器人 …… 450
3 双足步行机器人 …… 457
4 警备机器人 …… 465
5 轮椅机器人 …… 469
6 高速目标跟踪系统 …… 475
7 自动剪票机 …… 484
8 个人机器人PaPeRo …… 492

第10章 日本机器人竞赛大会

1 “相扑机器人”竞赛大会 …… 498
2 寻线竞赛大会 …… 505
3 机构创意竞赛 …… 512
4 日本高中机器人竞赛大会 …… 518
5 日本职业学校机器人竞赛大会 …… 524
6 微机遥控迷途通过竞赛大会 …… 530
7 日本高等职业学校机器人竞赛 …… 539
8 ROBO-ONE：双足步行机器人竞赛大会 …… 546
9 “RoboCup”竞赛大会 …… 554
索引 …… 561

第 1 章

机电一体化

● 责任编委
渡边嘉二郎
● 执　　笔
渡边嘉二郎

本章概述机电一体化的基本思想和方法，在各节分别介绍机电一体化的定义、机电一体化的作用、成熟的机电一体化系统以及机电一体化的基础知识和未来展望等内容。同时还介绍一些相关知识、应用实例和简单例题等。

另外，还希望读者通过对本章的学习，能够理解机电一体化与其他自动机械的联系，从而模仿和吸取其中一些有用的知识。

由于本章介绍的是机电一体化的基础知识，希望能够反复学习，要在学习了以后的各章节之后，再返回来读一遍，以便能够进一步加深理解。

1　什么是机电一体化

要　点

机电一体化就是“利用电子、信息(包括传感器、控制、计算机等)技术使机械柔性化和智能化”的技术。

解　释

术语的来源

“机电一体化(mechatronics)”一词起源于日本，是由**机械**和**电子**的两个英语单词 mechanism 和 electronics 合成的一个新的专用名词。

机械　电子

目　标

顾名思义，机电一体化技术的目标就是将机械技术与电子技术相结合，充分发挥各自的长处，弥补各自技术上的不足。

机械的强度较高，输出功率大，可以承受较大的载荷，但实现微小运动和复杂运动比较困难。而在电子领域，利用传感器和计算机可以实现复杂的**检测**和**控制**，但只利用电子技术无法实现重载运动。

检测　控制

将机械技术与电子技术相结合，可以在重载条件下实现微小运动和复杂运动。

机械的柔性化和智能化

机械的**柔性化**和**智能化**是指要使机械既能够像动物那样动作灵活，也能够像人类那样会思考判断。

柔性化　智能化

机电一体化的例子

机电一体化产品中一定有运动机械，并且采用了电子技术使运动机械实现柔性化和智能化。机器人、微机控制型缝纫机、自动对焦照相机、自动对焦防颤型摄像机等都是机电一体化产品。然而像装有微型计算机的电视机和电饭煲等，因为其工作原理在本质上是无运动的，所以它不属于机电一体化产品。

相关知识

◆ 控制工程学

控制工程学及控制技术与机电一体化技术的目标是一致的，机电一体化是只研究与机械运动相关的控制技术，而控制工程学研究的是更一般的控制技术，包括流体的流动、温度、压力等物理量的控制。

2　机电一体化的作用

要　点

产品采用机电一体化技术可以产生以下作用：

① 使产品具有原来所不具备的新功能。

② 增强产品的柔性(flexibility)。

③ 改善操作性能。

④ 容易满足多样性的需求。

⑤ 扩大设计的灵活性。

⑥ 改善生产的工艺性。

⑦ 使产品的体积小、质量轻。

⑧ 减少产品的零、部件数量。

⑨ 提高可靠性。

⑩ 提高品质。

⑪ 节能省力。

⑫ 降低成本。

解　释

传感器

计算机　控制信号

执行装置

软件

开发机电一体化系统的特点

机电一体化技术的本质是将电子技术引入机械控制中，也就是“利用**传感器**检测机械运动，将检测信息输入到**计算机**，经计算得到能够实现预期运动的**控制信号**，由此来控制**执行装置**”。其中最关键的是“经计算得到能够实现预期运动的控制信号”。这项工作就是开发计算机**软件**。软件开发是指编制计算机程序的内容，使之具有一定的功能，并通过键盘将程序输入计算机。不需要用螺栓和螺母来重新组装机械，也不需用电烙铁焊接电子线路，只需修改程序就可灵活地改变机械的运动。在计算机上，通过适当的软件进行控制，无论如何复杂的运动都可以实现。正是因为机电一体化技术的这种性质，才使其能够产生上述作用。

新功能的扩展与柔性的增强

采用机电一体化技术的最大作用如下：

① 扩展新功能。

② 增强柔性。

所产生的其他效果都是来源于这两种基本的作用。

相关知识

◆ 产品的定货制与机电一体化

产品的定货制(按照用户个人的特殊需求来制造和提供产品)是一种更高级的产品供货方式。为了满足这种供货方式必须采取多品种、小批量的生产方式。原来的大批量生产方式无法适应定货制的产品生产。机电一体化技术是生产定货制产品的关键技术。

◆ 自动化的作用

机电一体化技术是自动化技术之一。自动化可以分为以下几种:

① 过程自动化(PA),即处理流体和电气等连续体的系统自动化。

② 机械自动化(FA),或称为工厂自动化,即对螺钉、螺母、电阻和电容等固体进行操作的系统自动化。

③ 办公自动化(OA),即对办公信息进行处理的系统自动化。

这些都是以实现自动化为目的。

机电一体化技术的主要目标是实现机械自动化(FA)。过程自动化(PA)处理的是连续体,通过阀门的开关就能够使系统运行,比较容易实现自动化。而要对固体进行操作的系统自动化,必须对每个物体分别进行控制,所以在技术上存在的困难较多。

例 题

1 为什么微机控制型缝纫机是一个机电一体化的例子?

答 缝纫机是一种在机针上下运动的过程中将布缝到一起的机器。通过机针沿水平方向的移动,可以实现多种缝纫方法。以前的缝纫机用凸轮控制水平方向的运动。在微机控制型缝纫机上,将凸轮的信息存储在计算机中就能完成相同的工作。由于采用了计算机,不需要逐个更换凸轮,就可在缝纫过程中利用软件实现缝纫方法的变化,使缝纫机具有较高的柔性和智能性。

2 为什么机电一体化系统具有柔性而又设计灵活?

答 在机电一体化系统开发的特点中可以找到这方面的答案。机电一体化系统开发的主要内容是计算机软件的开发。软件开发需要的时间比较短,改变软件也比较容易。通过程序控制可以实现各种复杂的运动。所以系统具有很强的柔性,设计也比较灵活多样。

3 机电一体化系统

要 点

如图 1.1 所示，如果将机电一体化系统与灵活性和智能性最强的人体相对应，可由如下 5 个要素构成。

① 机械装置：能够实现某种运动的机构（相当于人类的骨骼）。

② 执行装置：驱动机械装置运动（相当于人类的肌肉）。

③ 能源：为执行装置提供能量（相当于人类的内脏）。

④ 传感器：检测机械运动的部件（相当于人类的感觉器官）。

⑤ 计算机：运动控制的计算和判断部分（相当于人类的神经和大脑）。

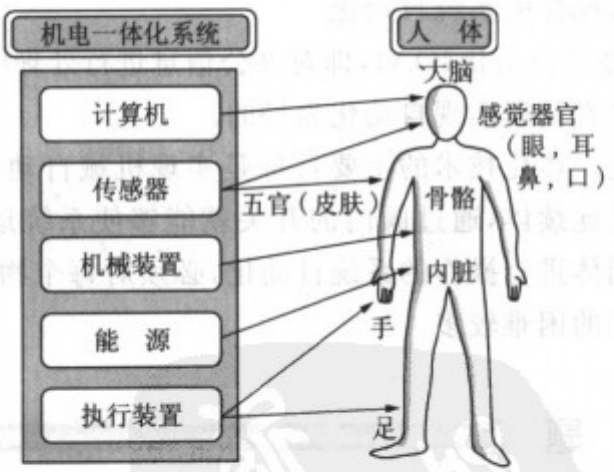


图 1.1 构成机电一体化系统的要素

解 释

典型的机电一体化系统——机器人

机器人是典型的机电一体化产品。下面以图 1.2 所示的机器人为例来分析机器人的系统构成。

① 机械装置：机器人的手指、手臂、手臂的连接部分和机座等是使机器人能够运动的机械结构。

② 执行装置：驱动机座上的机体、手臂、手指等运动的**电机**和**电磁**铁等。

电机 电磁

③ 能源：驱动电机的**电源**和驱动液压系统、气压系统的**液压源**和**气压源**。

电源

液压源 气压源

旋转角度
旋转角速度

④ 传感器：检测旋转编码器和测速发电机等的**旋转角度**和**旋转角速度**，用于监测机器人的运动。

⑤ 计算机：根据来自旋转编码器或测速发电机的信号，判断机器人的当前状态，并计算和判断要达到所希望的状态或者移动到某一目标应该如何动作。

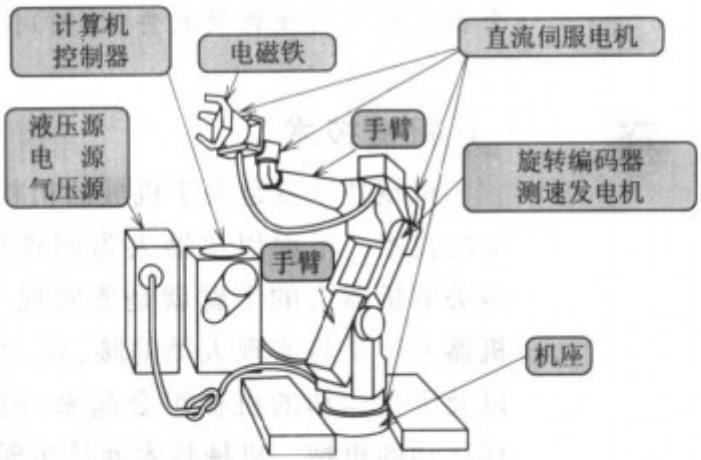


图 1.2 作为机电一体化系统典型例子的机器人

其他机电一体化系统

机器人是实现人类一部分技能的机械，很容易由上述5个要素与人体相对应。对于其他机电一体化系统，如微机控制型缝纫机、自动变焦照相机、自动变焦防颤型摄像机等，只要存在机械运动就必然也包含上述5个要素。

相关知识

◆ 机电一体化系统的组成

在机电一体化系统中，上述5个要素构成了“计算机→执行装置(能源)→机械装置→传感器→计算机”的信号闭环回路(closed loop)。这种信号流系统称为反馈系统。

有的机电一体化系统是由“计算机控制器(控制专用计算机)→执行装置(能源)→机械装置→传感器→计算机控制器”形成闭环控制，也有的机电一体化系统采用由高位计算机给出控制器指令的半闭环(semi closed)控制方式，还有的机电一体化系统是由“计算机→执行装置(能源)→机械装置→传感器”形成开环(open)控制系统。

4　机电一体化的相关技术

要　点

机电一体化系统由机械装置、执行装置、能源、传感器、计算机这5个要素构成，机电一体化的相关技术就是与这5个要素相关的硬件及软件(控制)技术。

解　释

机械技术

机械技术就是关于机械的机构及利用这些机构传递运动的技术。下面以机器人为例进行分析。如图1.3所示，多关节机器人的手臂就是要实现与人类手臂的同样功能。机器人就是将实现人类的腰、肩、大臂、小臂、手腕、肘部、手以及手指运动的机械组合起来，构造成能够传递像人类一样运动的机械。机械技术就是实现这种运动机构的技术。

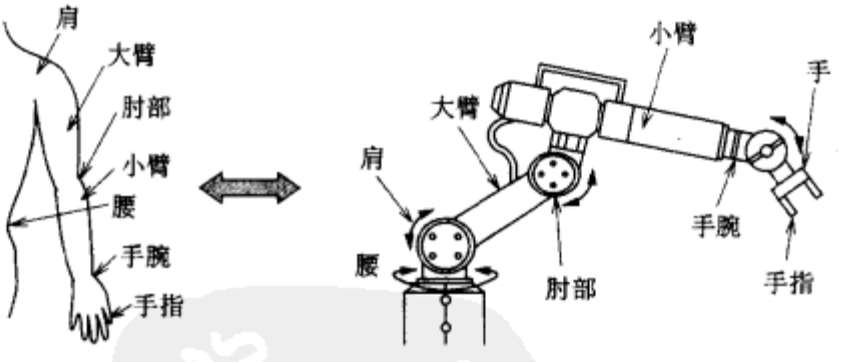


图1.3　人的胳膊与多关节机器人构造对比

执行装置技术

动力源

电动机

要使机构运动，必须有**动力源**，这种动力源就是执行装置。执行装置有利用电能的**电动机**(包括直流电动机、交流电动机、步进电动机和直线电动机等)，以及利用液压能量和气压能量的液压驱动装置和气压驱动装置等。

电力电子技术

随着**电力电子技术**的发展，驱动电机的电力控制系统的体积越来越小，控制也越来越方便，对直流电动机和交流电动机都能够简单地实现高精度控制。可实现高速、高精度控制是电动机的一个重要特点。

气动执行装置

气动执行装置是一种利用工厂的气源，结构简单、使用

方便的执行装置。要用这种执行装置实现高精度控制比较困难，但适用于对较轻的物体进行推拉等简单操作。

液压执行装置

液压执行装置在修路工地上可以经常见到，推土机上驱动动力铲的装置就是液压执行装置，在机器人的手臂驱动装置中也经常采用。虽然需要液压站系统，但可以由简单的结构实现大功率驱动。

传感器技术

传感器按测试原理和被检测的物理量可以分为许多种。机械运动主要有位移、速度、加速度、力、角度、角速度、角加速度和距离等，这些物理量可以转换成两极板间的电容量、应变引起的电阻变化、磁场强度与磁场频率的变化、光与光的传播、声音的传播、哥里奥利(Corioli)力等其他物理量，最终都要转换成电压或者频率信号。

分辨率　精度

传感器的主要指标是**分辨率**和**精度**，同时还要求在任何环境下都能够可靠地工作。

计算机技术

由传感器检测的机械运动信号一般都要转换成与机械运动成比例的连续电压信号，这种连续信号称为**模拟信号**，模拟信号无法直接输入计算机。计算机内部能够处理的信号是数字信号，一方面，来自传感器的模拟信号必须经过**A/D(模拟/数字)转换器**转换成**数字信号**才能够输入计算机；另一方面，要将计算机内的信号转换成模拟信号时，必须采用**D/A(数字/模拟)转换器**。图 1.4 所示的是计算机与传感器和执行装置的连接框图。

模拟信号

A/D(模拟/数字)转换器

数字信号

D/A(数字/模拟)转换器

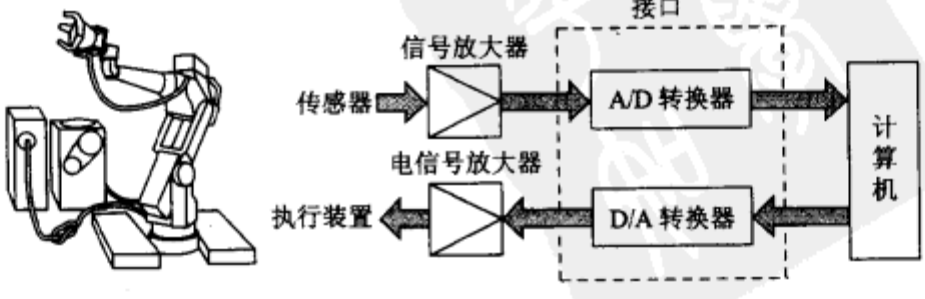


图 1.4　计算机与传感器和执行装置的连接框图

在计算机内部，以传感器信号为基础，采用计算机的程

序语言来编制处理程序。计算机的通用程序语言有汇编语言和编译语言(如C语言等),在机器人和数控机床上一般采用专用的程序语言。

控制技术

机械技术、执行装置技术、传感器技术和计算机技术,这4个要素主要是关于**硬件**方面的技术,而控制技术可以说主要是**软件**方面的技术。但控制技术不是计算机语言及其管理方面的技术,而是考虑如何根据传感器信号使执行装置和机械装置很好地运动,并编制出能够实现这种目标的计算机程序的技术。

硬件

软件

控制方法可以分为如下两大类:

① 顺序控制。通过开关或继电器触点的接通和断开控制执行装置的启动或停止,从而对系统依次进行控制。

② 反馈控制。被控制量为位移和速度等连续变化的物理量,在控制过程中要不断地调整被控制量,使之达到设定值的控制方式。

相关知识

◆ 与机电一体化相关的学科

支撑机电一体化技术的学科有如下几个方面:

① 机械工程学科。机械原理(机械运动学)、力学和机械零件。

② 检测与控制学科。传感器、执行装置、控制理论和数字控制。

③ 电子信息学科。电子电路、信息处理和计算机编程。

例 题

试说明机电一体化系统的组成。

答　机电一体化系统由第1.3节中图1.1所示的5个要素组成。按系统信号回路形式可将机电一体化系统分为闭环、半闭环和开环三种类型。

另外,闭环方式和半闭环方式的机电一体化系统的机械运动精度高,且抗外部干扰能力强,但运动速度较慢。而开环方式的机电一体化系统具有与闭环系统和半闭环系统恰好相反的特点,这种系统可以实现快速的机械运动,但精度较低,且抗外界干扰能力较差。

5 机电一体化技术的展望

要 点

进入21世纪以来，机电一体化技术得到了更大的发展。传感器的性能也进一步得到提高，对传感器信号的处理和判断的智能化程度也达到更高的水平，出现了具有更高柔性和自适应性的机电一体化系统。

解 释

传感器性能的提高

高性能传感器应具有如下性能之一：

① 高精度传感器。自身的检测精度高，对温度变化不敏感，可抗噪声干扰。

② 智能传感器。在传感器内部装有微型计算机，可以进行**智能化处理**。

智能化处理

③ 组合传感器。将几个**传感器组合**成一体，形成能够检测单个传感器无法检测的高性能的信息传感器系统。

传感器组合

高智能化处理

高智能化处理就是像人的大脑一样，能够在一些基本知识的基础上对其进行合理的组合和判断。能够进行这种处理的软件称为**人工智能**软件。智能化处理过程就是将基本知识以知识库的形式存储在计算机的存储器中，自动提取与某一知识相关联的知识数据，再将这些知识进行合理的推理组合。研究智能化处理的学科称为**智能工程学**。

人工智能

智能工程学

自适应性

机械在启动以后，不需要人的干预，就能够自动地完成指定的各项任务，并且在整个过程中能够自动适应所处状态和环境的变化。机械一边适应各种变化一边作出新的判断，以决定下一步的动作。

例如，**自适应移动机器人**能够通过自己的眼睛来观察所处的状态和环境，自动寻找目标路线，并沿着路线移动。

自适应移动机器人

微型机械

随着**微细加工技术**的发展，也出现了超小型的机械结

微细加工技术

构。例如，1μm大小的电动机。在必须进行微小运动的工作中，就需要利用这种**超小型机械**来开发机电一体化系统。

超小型机械

相关知识

◆ 移动机器人的智能移动实例

图1.5是一个移动机器人的例子。传感器、移动机构、行动决策的计算机和移动控制器等部分构成了一个完整的机电一体化系统。它被设计成智能型机器人，计算机内部实现的知识库、路径规划、导向指令、导向控制、移动控制器及移动机构等路径决策处理部分占据了整个系统的一大半。

21世纪的机电一体化系统将向“头脑发达”和作为感觉器官的传感器的多样化方向发展。

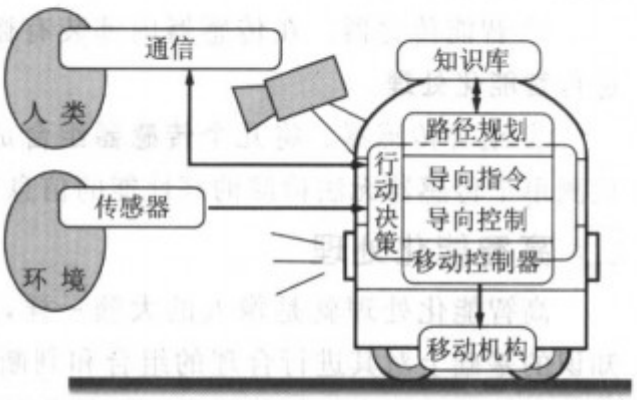


图1.5　移动机器人的智能化行动决策示例

例题

要使机械具有自适应性，机电一体化系统的5个要素中，哪些要素必须具备何种功能？

答　在自适应方面最先遇到的问题是如何掌握周围状态和环境的变化。要了解环境的变化，就需要传感器。而且了解环境需要考虑多种因素，因此只用一个传感器往往无法正确检测环境变化，必须用多个传感器从多方位进行检测，互相配合，并将各传感器的信号进行综合才能够获得确切的环境变化信息。这样，就要用到传感器组合技术。

在适应环境的同时还要控制机械运动，因此必须具有能够完成高智能化处理的计算机及其软件。这就需要有按人工智能原理设计的、能够代替人类进行思考的计算机系统。

第 2 章

机电一体化的基础知识

● 责任编委
大垣　博
● 执　　笔
木村久幸(1~9)
大垣　博(10~20)

要学习机电一体化，就必须全面学习机械、控制、电子电气和信息处理等各方面技术。采取螺旋分阶段提高的方式，均衡掌握各方面的知识，是学好机电一体化技术的有效途径。本章将引导读者进入第一个阶段。

本章内容分为“机械基础”、“控制基础”、“电子电气基础”和“信息处理基础”四个部分。为了能够使读者学好机电一体化的基础知识，还选择了必须掌握的题目加以解释。

为了能够很好地理解第3章以后的内容，读者应熟读自己没有掌握的内容。在以后的学习中，如果遇到难以理解的内容，读者可以返回本章，重新学习有关内容。

1　机械基础

要　点

所谓机械，就是将具有一定强度的物体组合起来，接受外界提供的能量，按照人们的要求实现确定的相对运动，从而完成某些有效工作的装置。

机械由以下四个部分组成：

① 输入部分。接受能量、物质和信息的部分。

② 转换和传动部分。将接受的能量、物质和信息等传递给其他机械或者转换成其他形式的部分。

③ 输出部分。直接完成指定工作的部分。

④ 安装固定部分。使机械上的各个部分保持确定位置的部分。

解　释

运动副

运动副

机械和仪器等都是由许多构件组成，各构件互相接触并做相对运动。这种构件的组合称为**运动副**。

移动副　转动副　螺旋副

如图 2.1 所示，运动副可分为做相对直线运动的**移动副**、做相对转动的**转动副**和做相对螺旋运动（在做旋转运动的同时还做直线运动）的**螺旋副**。

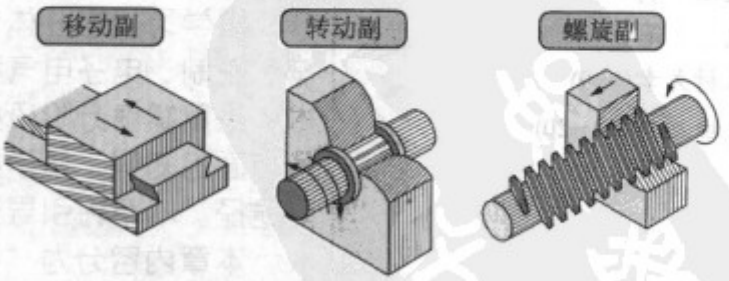


图 2.1　几种运动副

机　构

机械是由各种运动副组成，由此来依次传递运动。

机构

以传递运动或变换运动为目的，由若干个运动副组成的具有确定运动的系统称为**机构**（mechanism）。

图 2.2 所示为几种机构的例子。图的右侧是能够平滑

加速的环面CVT(无级变速器)。它不仅是20世纪初比较流行的固体摩擦传动的实际应用,同时也要依靠CAD/CAM技术和特殊性能润滑油的不断开发。

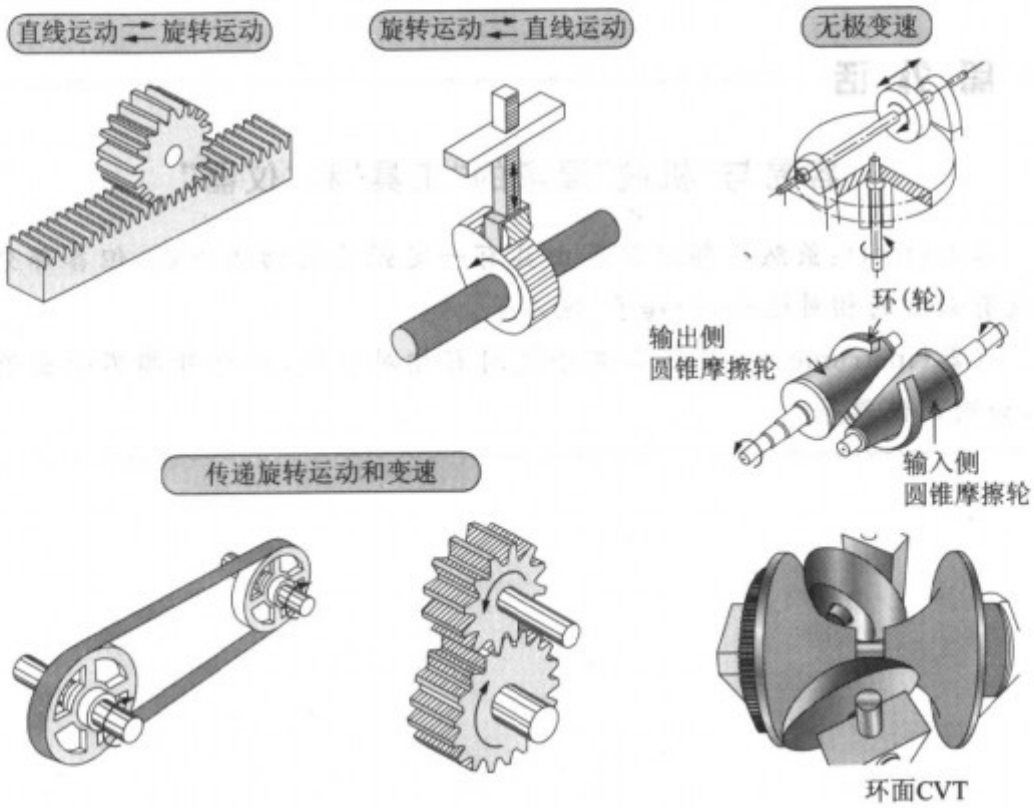


图2.2 运动转换与传动机构

通用机械零、部件

机械由许多零、部件组成,在这些零、部件中,螺栓、螺母、轴、齿轮和弹簧等零、部件在各种机械中几乎都会用到,这些零、部件统称为通用机械零、部件(machine element)(见第2.4节)。

相关知识

◆ 通用机械零、部件的标准化

在各种机械上都要使用通用零、部件,所以实现标准化对于应用十分方便。在日本有日本工业标准(JIS),在国际上有国际标准化组织(ISO)制定的国际标准。

通用机械零、部件已经实现了标准化，在设计中积极采用标准件，对于提高效率、降低成本是非常重要的。对于没有实现标准化的零、部件，要按照强度和刚度来确定尺寸。在确定其尺寸数值时，也应该尽量采用优先数。

题外话

容易与“机械”混淆的“工具”和“仪器”

工具(tool)：虽然各部分都是由具有一定强度的物体组成，但各部分之间没有必要的相对运动，如锤子、锉刀等。

仪器(instrument)：虽然各部分之间有相对运动，但对外部不输出有用功，如测试仪器等。

2 力、功和功率

要 点

如图 2.3 所示，表示力(force)时必须表示出力的大小、方向和作用点这三个因素，这三个因素称为力的三要素。

在力的基础知识中，最重要的是力的合成与分解、力矩、力的平衡、功和功率等方面内容。



图 2.3 力的三要素

解 释

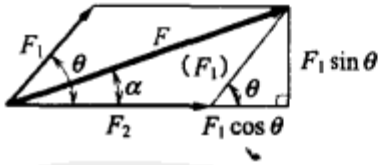
作用于一点上的力的合成与分解

二力的合成

二力的合成(composition) 如图 2.4 所示。

$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\theta}$$

$$\tan\alpha=\frac{F_1\sin\theta}{F_2+F_1\cos\theta}$$



$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\theta}$$

$$\tan\alpha=\frac{F_1\sin\theta}{F_2+F_1\cos\theta},\quad \alpha=\arctan\left(\frac{F_1\sin\theta}{F_2+F_1\cos\theta}\right)$$

图 2.4 二力的合成

力的分解

力的分解(decomposition) 将力 F 分解成互相垂直的两个力 F_x 和 F_y 时，可以用下面的式子计算(见图 2.5)：

$$F_x=F\cos\theta$$

$$F_y=F\sin\theta$$

多个力的合成

多个力的合成 x 轴方向上的合力

$$F_x=x_1+x_2+\cdots=F_1\cos\theta_1+F_2\cos\theta_2+\cdots$$

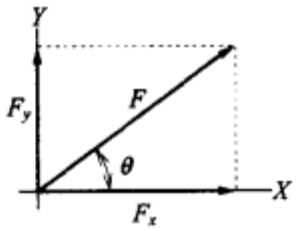
y 轴方向上的合力

$$F_y=y_1+y_2+\cdots=F_1\sin\theta_1+F_2\sin\theta_2+\cdots$$

合力 F 的大小和方向可由下面的式子求得(见图 2.6)：

$$F=\sqrt{F_x^2+F_y^2}$$

$$\tan\alpha=\frac{F_y}{F_x}$$



水平分力 $F_x=F\cos\theta$

垂直分力 $F_y=F\sin\theta$

图 2.5　力向两垂直方向分解

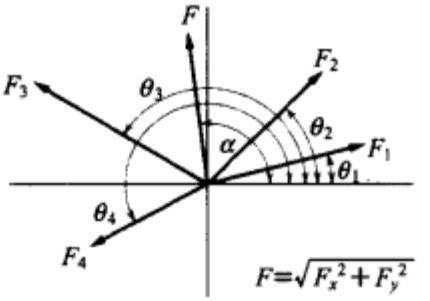


图 2.6　多个力的合成

力　矩

力矩

力矩(moment of force)M 用力的大小 F 和从回转中心到力作用线之间的垂直距离 r 的乘积 $F\cdot r$ 来表示。当一个物体受到多个力的作用时，作用在物体上的总力矩等于各个力的力矩之和，即

$$M=M_1+M_2+M_3+\cdots$$

力的平衡

当作用在物体上的各个力 F_1、F_2、…达到平衡时，若将各力分解成 X 轴方向上的分力 X_1、X_2、…和 Y 轴方向上的分力 Y_1、Y_2、…，则下面的式子成立：

X 轴方向上的合力

$$F_x=X_1+X_2+\cdots=0$$

Y 轴方向上的合力

$$F_y=Y_1+Y_2+\cdots=0$$

合力矩

$$M=M_1+M_2+\cdots=0$$

重　心

如图 2.7 所示，若设物体各部分的质量为 w_1、w_2、…，各部分的重力作用点的坐标为 (x_1,y_1)、(x_2,y_2)、…，则物体的

重心

重心(center of gravity)G 的坐标 (x,y) 可以用下面的式子求得：

$$W=w_1+w_2+\cdots$$

$$x=\frac{w_1x_1+w_2x_2+\cdots}{W}$$

$$y=\frac{w_1y_1+w_2y_2+\cdots}{W}$$

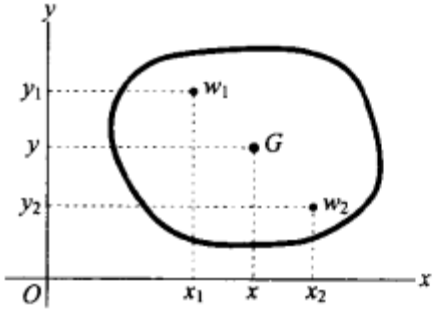


图 2.7 重心的位置

功

功

力 F 所做的**功**(work)A 用力的大小 F 与物体沿着力的作用方向移动的距离 s 的乘积 $F\cdot s$ 来表示。当力的方向与物体移动方向之间成 θ 角时，位移方向上的分力为做功的力，这时

$$A=(F\cos\theta)s=Fs\cos\theta$$

功 率

功率

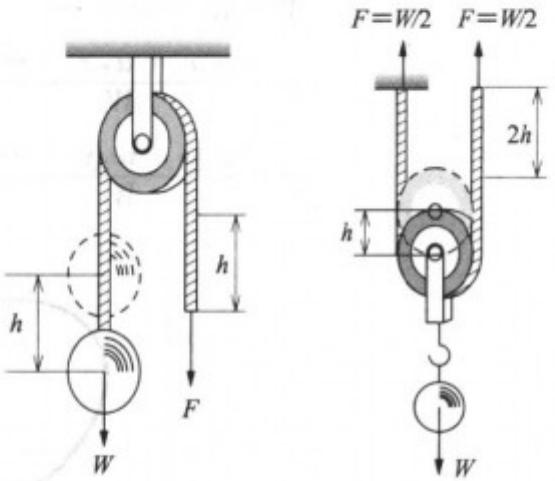
单位时间内所做的功叫做**功率**(power)。若在 t 时间内连续做功为 A，则功率 P 可以用下面的式子来表示：

$$P=\frac{A}{t}=\frac{Fs}{t}=F\frac{s}{t}=Fv$$

滑 轮

定滑轮 动滑轮

滑轮(block)分为**定滑轮**(fixed pulley)和**动滑轮**(movable pulley)两种，如图 2.8 所示。使用定滑轮时，力的大小与载荷大小相同，但力的作用方向发生变化，可以使力施加在容易实现的方向上。使用动滑轮可以使作用力减小为载荷的一半。



(a) 定滑轮　　(b) 动滑轮

图 2.8　定滑轮与动滑轮

相关知识

◆力　偶

大小相等、方向相反、作用线互相平行(间隔为 d)的一对力叫做力偶(couple)。力偶的合力 R 为 0,力矩 M 为 $F \cdot d$,力偶的作用是使物体产生旋转运动。

例　题

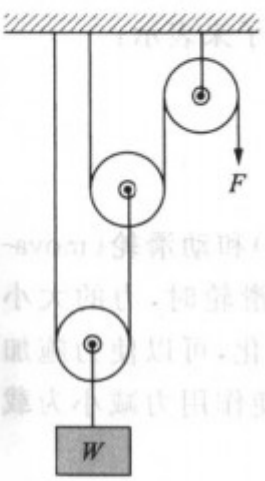


图 2.9　滑轮组

在图 2.9 所示的滑轮组中,若 $W=160\text{N}$,那么绳索的拉力 F 应为多大?

答　因为滑轮组的动滑轮数 n 为 2,所以

$$F=\frac{W}{2^n},n=2$$

因此 $F=\dfrac{160}{2^2}=\dfrac{160}{4}=40(\text{N})$

3 材料力学基础

要 点

当物体受到外部载荷作用时，它就会在内部产生应力(stress)，外部形成应变(strain)。载荷的类型不同，所产生的应力的类型也不相同。构成物体的材料具有应力、应变和膨胀系数等特有的力学性能。在实际应用中，必须根据具体的使用条件来进行强度设计。

解 释

载荷的种类

拉伸载荷

压缩载荷

剪切载荷

静载荷

动载荷

载荷的种类如图 2.10 所示，按载荷的性质可以分为**拉伸载荷**、**压缩载荷**和**剪切载荷**。

按载荷的变化速度可以分为**静载荷**和**动载荷**。其中动载荷又可以分为如下两种：

① 交变载荷。载荷的大小呈周期性变化。可进一步分为作用力只有拉伸或者只有压缩的单向交变载荷，以及拉伸和压缩交替作用的双向交变载荷。

② 冲击载荷。在较短的时间内施加的冲击性载荷。

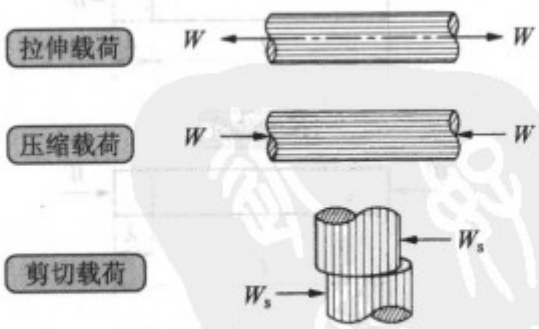


图 2.10 载荷的种类

应 力

应力分为由拉伸载荷引起的拉应力、由压缩载荷引起的压应力和由剪切载荷引起的剪应力。拉应力和压应力都产生在横截面的法线方向上，这种应力通常称为**正应力** σ(normal stress)；而剪应力产生在横截面的切线方向上，通常称为**切应力** τ(tangential stress)。

正应力

切应力

正应力 $\sigma=\dfrac{W}{A}$，　切应力 $\tau=\dfrac{W_s}{A}$

其中，W 为拉伸（或压缩）载荷；W_s 为剪切载荷；A 为横截面面积。

应　变

应变量

单位长度材料的变形量称为**应变量**，简称应变。

轴向应变　如图 2.11 所示，材料在轴向载荷的作用下产生的轴向变形量 λ 与材料的原有轴向长度 l 的比值称为**轴向应变** ε。

轴向应变

$$\varepsilon=\frac{\lambda}{l}$$

剪切应变　如图 2.12 所示，在距离为 l 的两个平行平面内的剪切力 W_s 的作用下产生很小的剪切变形时，剪切变形量 λ 与距离 l 的比值称为**剪切应变** γ，对应的剪切变形角 ϕ 称为**剪切角**。

剪切应变

剪切角

$$\gamma=\frac{\lambda}{l}=\tan\phi\approx\phi$$

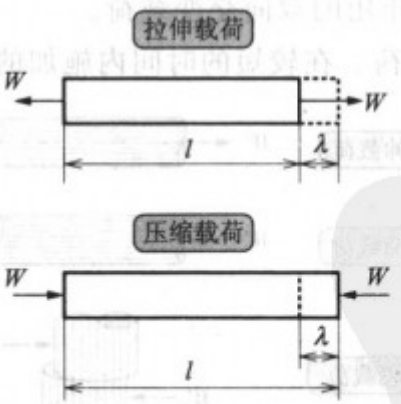


图 2.11　轴向应变

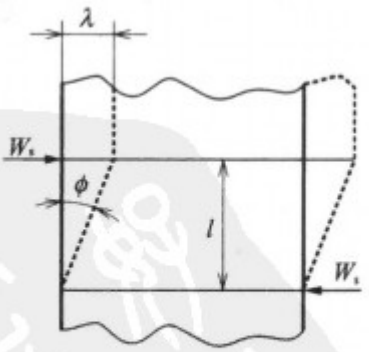


图 2.12　剪切应变

横向应变　如图 2.13 所示，材料在轴向载荷的作用下产生轴向拉伸或压缩变形的同时，在垂直于轴线方向将产生相应的缩小或延伸变形。设横向变形量为 δ，横截面的直径为 d，则二者的比值 ε_1 称为**横向应变**。

横向应变

$$\varepsilon_1=\frac{\delta}{d}$$

应力与应变的关系

载荷-拉伸变形曲线

载荷-拉伸变形曲线 通过拉伸实验可以得到**载荷-拉伸变形曲线**。根据载荷-拉伸变形曲线，将载荷转换成应力，将拉伸变形转换成应变，就可以得到如图 2.14 所示的**应力-应变曲线**。在应力较小时，应力与应变成正比。在应力-应变曲线上，应力与应变保持一定比值不变的极限点所对应的应力值称为**比例极限**(limit of proportionality)。

应力-应变曲线

比例极限

材料在卸载后能够恢复到原始状态，不产生塑性变形的极限点 B 所对应的应力值称为**弹性极限**(limit of elasticity)。

弹性极限

在点 C 与 D 之间发生的变化是碳素钢特有的现象。这时，即使应力减小应变也会增大，这种现象称为屈服，此时的应力值称为**屈服点**。

屈服点

在应力-应变曲线上，E 点的应力达到最大值 σ_{max}，该极限应力值称为**极限强度**(ultimate strength)。

极限强度

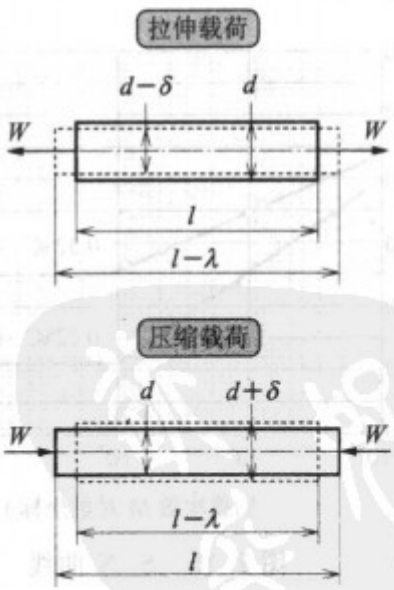


图 2.13 横向应变

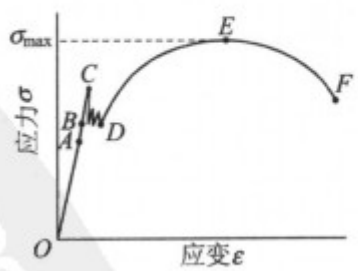


图 2.14 应力-应变曲线

弹性模量

在弹性变形区内，应力与应变的比值恒定，该比值称为弹性模量。

应力/应变＝常量(弹性模量) 〔胡克定律〕

① 轴向弹性模量。在拉伸实验中的弹性范围内，轴向应力与轴向应变之间存在一定的比例关系，其比例常数称

轴向弹性模量

为**轴向弹性模量**(modulus of longitudinal elasticity)E。

$$E=\frac{\sigma}{\epsilon}=\frac{Wl}{A\lambda}$$

② 剪切弹性模量。在弹性范围内，剪应力 τ 与剪应变 γ 之间也存在一定的比例关系，其比值称为**剪切弹性模量**(modulus of transverse elasticity)G。

剪切弹性模量

$$G=\frac{\tau}{\gamma}=\frac{Wl}{A\lambda}=\frac{W}{A\phi},\ \phi=\frac{W}{AG}$$

疲劳破坏与 S-N 曲线

材料经过反复加载后，载荷即使比极限强度低很多，也会使材料遭到破坏，这种现象称为**疲劳破坏**。在图 2.15 所示的 S-N 曲线中，S 为反复加载的载荷，N 为发生疲劳破坏的加载次数，曲线的水平部分称为**疲劳极限**。当材料在疲劳极限以下使用时，材料不会发生破坏。疲劳极限是材料的强度指标之一。

疲劳破坏

疲劳极限

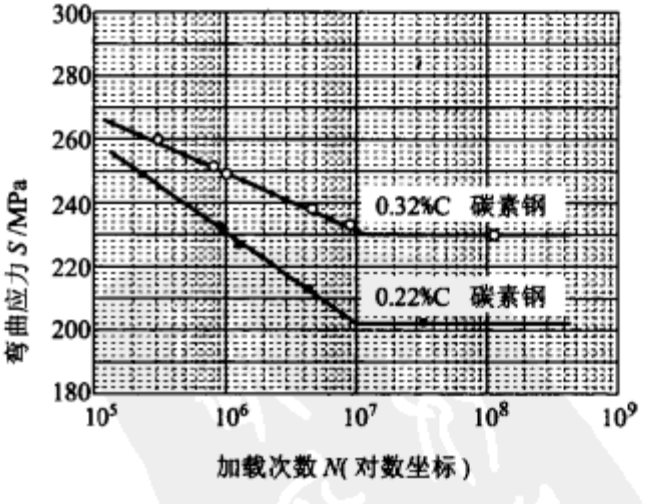


图 2.15　S-N 曲线

安全系数

材料的极限强度 σ_{max} 与许用应力 σ_a 的比值称为**安全系数**(factor of safety)S。

安全系数

$$S=\frac{\sigma_{max}}{\sigma_a}$$

所以

$$\sigma_a=\frac{\sigma_{max}}{S}$$

在零件设计过程中，制定许用应力要慎重。如果零件是受静载荷的作用，那么，对脆性材料，σ_{max} 应是抗拉强度；对塑性材料，σ_{max} 应是抗拉强度、屈服点（或屈服极限）。如果零件是受交变载荷的作用，σ_{max} 就应是疲劳强度。

安全系数要根据载荷的种类、工作环境、材料的可靠性以及对社会的影响等因素制定，安全系数是决定许用应力的依据。通常，一般结构材料 S 选 3，曲轴 S 选 15。

应力集中

具有相同横截面的材料受到拉伸或压缩时，在截面的各部分上所产生的应力都相等。但是，在截面形状发生急剧变化的部位，所产生的应力就会大于截面上的平均应力。如图 2.16 所示，x-x 截面上的局部最大应力 σ_{max} 大于载荷除以截面积所得到的平均应力 σ_n。

应力集中

由于截面形状的突变，导致截面上局部应力增大的现象称为**应力集中**(stress concentration)。因为应力集中点上容易发生疲劳破坏，所以应当特别重视。

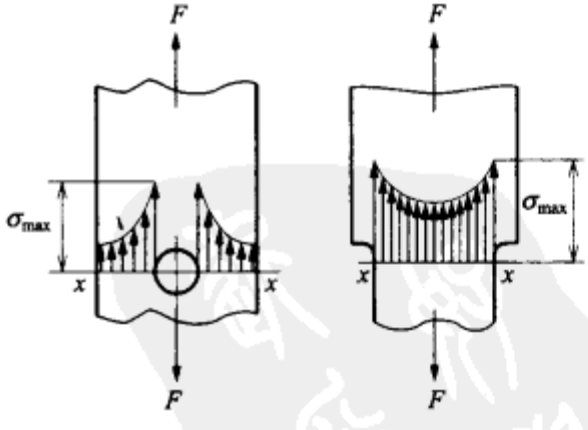


图 2.16 应力集中

热应力

若有一金属棒原始长度为 l，两端处于自由状态，其热膨胀系数为 α，当温度由 t 上升至 t' 时，金属棒的长度延长至 l'，延长量为 λ，则存在如下关系式：

$$\lambda = l' - l = \alpha(t' - t)l$$

但是，若金属棒的两端固定，不能自由伸长，当温度由 t 上升至 t' 时，就相当于材料的长度由 l' 被压缩至 l，压缩量为

应变

λ，此时的**应变**可以由下面的式子计算：

$$\varepsilon=\frac{\lambda}{l'}\approx\frac{\lambda}{l}=\frac{\alpha(t'-t)l}{l}=\alpha(t'-t)$$

$$\sigma=E\varepsilon=E\alpha(t'-t)$$

蠕变与低温脆性

蠕变

对于塑性材料，如果长时间施加小于弹性强度的拉伸载荷，随着时间的增加，应变逐渐增大的现象称为**蠕变**，这种现象在高温状态下特别显著。因此，在设计高温环境下工作的零件时，必须考虑材料的蠕变极限。

低温脆性

另外，碳素钢构件在零度以下使用时，发生塑性降低的现象称为**低温脆性**。焊接等构件的低温脆性特别明显。

梁

悬臂梁
双端固定梁
简支梁　连续梁
集中载荷梁
均布载荷梁

梁的种类　梁的种类可分为如图 2.17 所示的**悬臂梁**、**双端固定梁**、**简支梁**和**连续梁**等。此外，按梁的载荷形式还可以分为如图 2.18 所示的**集中载荷梁**和**均布载荷梁**。

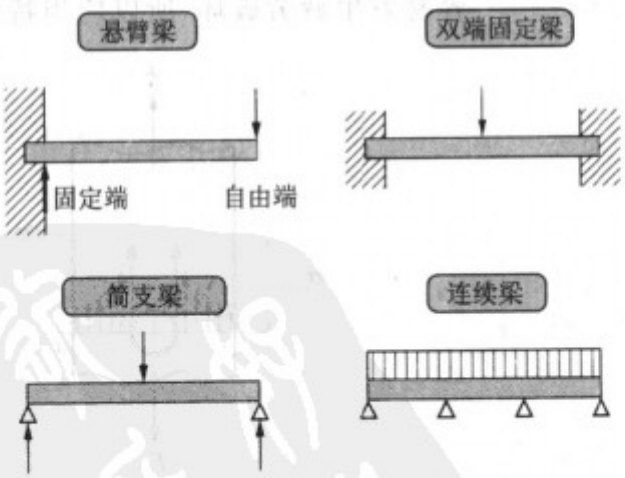


图 2.17　梁的种类

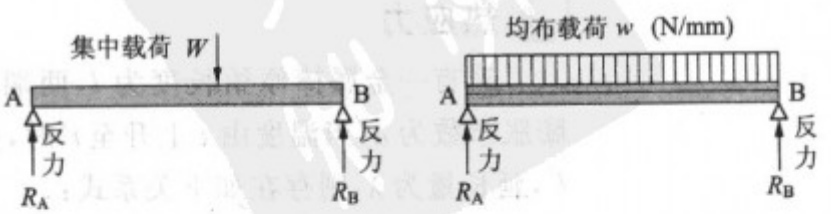


图 2.18　载荷的种类

梁的剪切力与弯矩 梁的剪切应力与弯矩如图 2.19和图 2.20所示。

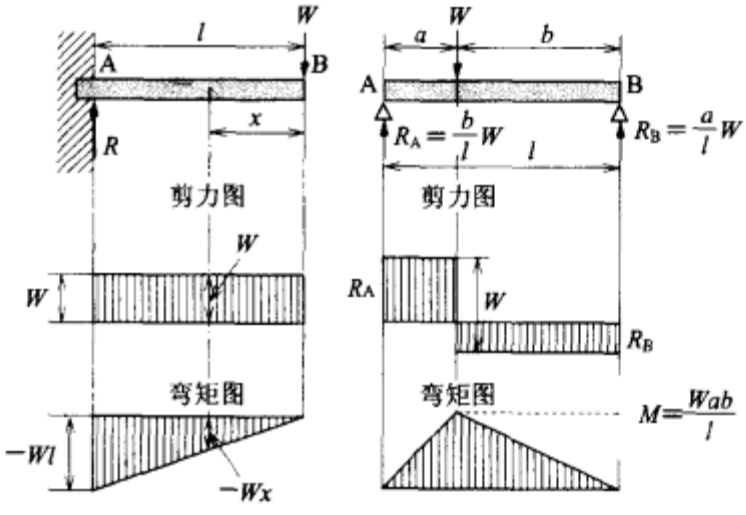


图 2.19 集中载荷

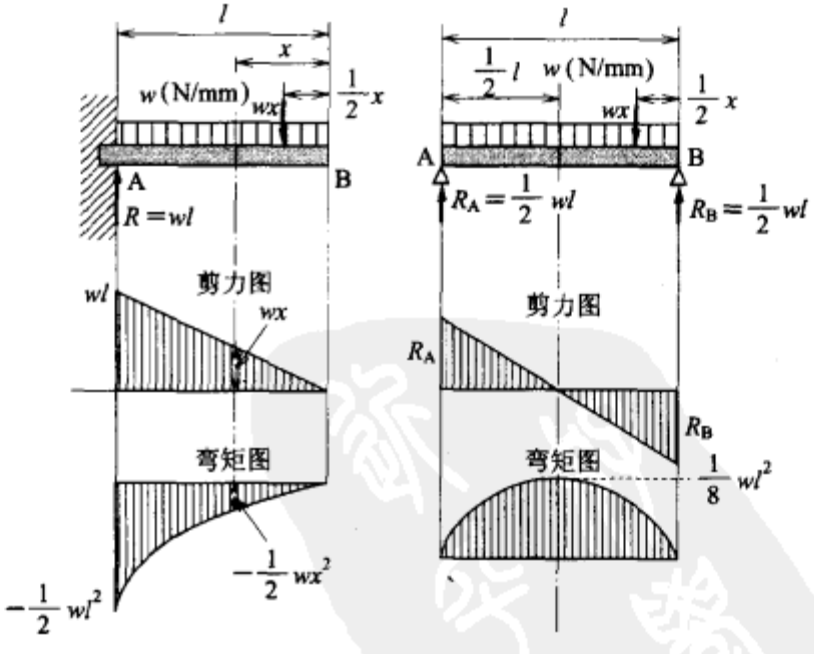


图 2.20 均布载荷

轴的扭转

扭转 轴

在力偶的作用下，杆件发生绕轴线扭转变形的过程称为**扭转**(torsion)，受扭转作用的杆件称为**轴**(shaft)。

扭矩 转矩

当长度为 l、直径为 d 的轴一端固定、另一端受到力矩 T 的作用时，就会发生扭转变形，达到平衡时的扭转变形角度为 θ。这时轴所受的力矩称为**扭矩**或**转矩**(torque)，所产

扭转角

生的扭转变形角 θ 称为**扭转角**(见图 2.21)。

若剪切角为 ϕ、剪切应变为 γ、剪切弹性模量为 G,则剪应力 τ 可由下面的式子求得:

$$\gamma=\tan\phi=\frac{\frac{d}{2}\Delta\theta}{\Delta x}=\frac{\frac{d}{2}\theta}{l}=\frac{d\theta}{2l}$$

$$\tau=G\gamma=G\frac{d\theta}{2l}$$

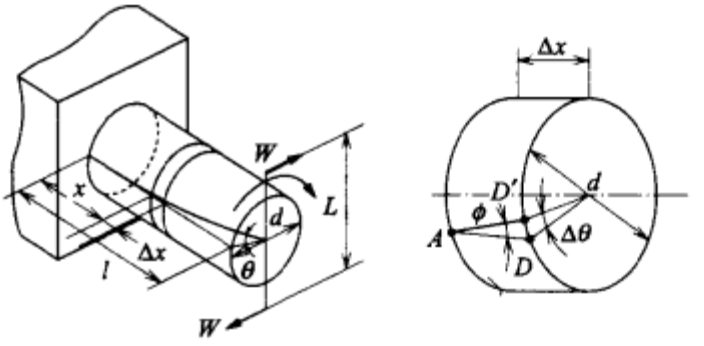


图 2.21　轴的扭转

例　题

试绘制如图 2.22 所示简支梁的剪力图和弯矩图。

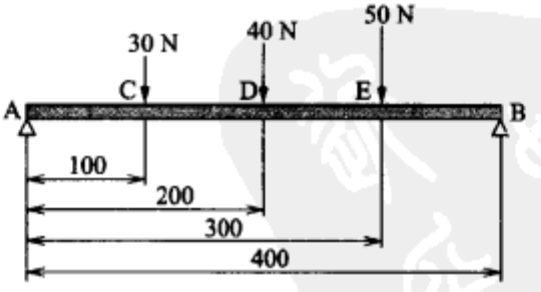


图 2.22　简支梁

答　因为绕 A 点的弯矩为

$$R_B=(30\times100+40\times200+50\times300)\div400=65(\text{N})$$

$$R_A+R_B=30+40+50=120$$

所以

$$R_A=120-R_B=120-65=55(\text{N})$$

各点上的弯矩为

$$M_C=R_A\times100=5500(\text{N}\cdot\text{mm})$$

$M_D = R_A \times 200 - 30 \times 100 = 8000(N \cdot mm)$

$M_E = R_B \times 100 = 6500(N \cdot mm)$

剪力图和弯矩图如图 2.23 所示。

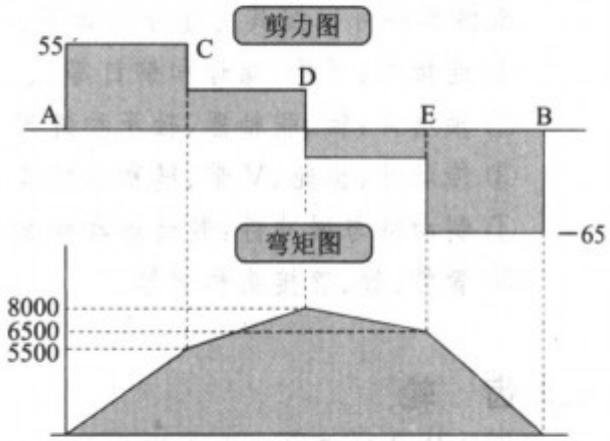


图 2.23 剪力图和弯矩图

4　机械零件基础

要　点

机械零件可以按其用途分类如下。

① 连接件：螺栓、螺母和铆钉等。

② 轴用件：轴、联轴器、轴承和键等。

③ 传动件：齿轮、V带、链和凸轮等。

④ 制动件与缓冲件：制动器和弹簧等。

⑤ 管件：管、管接头和阀等。

解　释

齿　轮

直接接触

齿轮传动是通过轮齿之间的相互啮合实现**直接接触**的传动方法。这种传动方法的传动比精确、传递功率较大(见第3章3.7节和3.8节)。

带传动

摩擦力

带传动方法适用于主动轴和从动轴之间距离较大的场合，它的特点是传动平稳，振动噪声小。但是，由于带传动是利用**摩擦力**来传递力矩的，容易产生打滑现象，因而不能精确地传递运动(见第3章3.9节)。

链传动

滚子链

链传动与带传动在传递运动方面很相似，但由于不是利用摩擦力来传递运动，所以传动效率较高。不过，这种传动方法容易产生振动和噪声，所以不适用于高速传动。链传动是将链轮安装于传动轴上，通过绕在链轮上的链条来传递运动。链条由内链节和外链节相互连接构成，其中**滚子链**的应用较多。

离合器

摩擦离合器
同步离合器
电磁离合器

当要求被动轴作间歇运动时，需要采用离合器。离合器可分为**摩擦离合器**(圆盘离合器、圆锥离合器)、**同步离合器**(牙嵌式离合器)、**电磁离合器**(磁性离合器)等。

制动器

制动器是将机械运动部件的动能转换成热能，从而使

机械降速或者停止的装置(见第3章3.6节)。

摩擦制动器

最常用的制动器是**摩擦制动器**。摩擦制动器的制动力除了来源于人力以外,还可以来源于流体压力和电磁力等。

构 件

运动链

构件

在机械中为了实现一定的运动,用各种运动副连接各运动部分所构成的系统称为**运动链**(chain)。运动链中由零件组成的各个刚性系统分别称为**构件**(或称为连杆,link)(见第3章3.10节)。

凸 轮

平面凸轮

空间凸轮

凸轮机构是一种利用凸轮的特殊轮廓,呈周期性地传递复杂运动的机构。凸轮可以大致分为**平面凸轮**和**空间凸轮**两大类(见第3章3.11节)。

弹 簧

弹簧是一种利用材料的弹性变形实现如下功能的零件(见第3章3.3节)。

① 吸收能量,起到缓冲和防振作用。

② 利用弹簧的变形量与载荷大小成正比的性质进行力的测量。

③ 利用弹簧变形的储能性质来缓慢释放能量。

④ 利用弹簧的弹性实现复位等。

相关知识

◆ 行星齿轮机构

如图2.24所示,将齿轮A、齿轮B和系杆R安装在轴上,如果让齿轮A固定,系杆R绕轴O_1旋转,那么,齿轮B将在绕轴O_2自转的同时,还要绕轴O_1公转。这种机构称为行星齿轮机构(planetary gear),它常被应用于减速装置中。

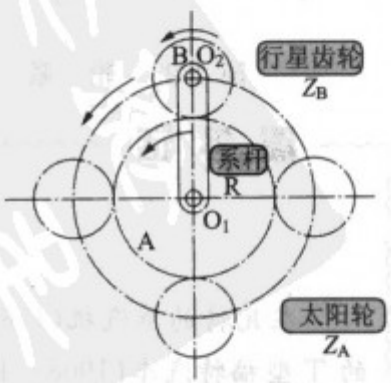


图2.24 行星齿轮装置

令图2.24中齿轮A和齿轮B的齿数分别为$Z_A=80$,$Z_B=20$,逆时针旋转为(+),顺时针旋转为(−),则可以作如下分析:

① 首先，令齿轮 A、齿轮 B 和系杆 R 固连，同时绕轴 O_1 旋转 +1 周。

② 然后令系杆 R 固定，齿轮 A 旋转 −1 周。因为齿轮 A 和齿轮 B 为外啮合，所以齿轮 B 与齿轮 A 的旋转方向相反，其转数为

$$(-1)\times\left(-\frac{80}{20}\right)=+4$$

③ 这时齿轮 A、齿轮 B 和系杆 R 的正方向(+)转数应为① 、② 两次旋转运动的转数之和，齿轮 B 的正向转数为 +1+4=+5(见表 2.1)。

表 2.1　正向转数计算表

	R	A	B
(1)全固定	+1	+1	+1
(2)系杆固定	0	−1	+4
(3)正向转数	+1	0	+5

例　题

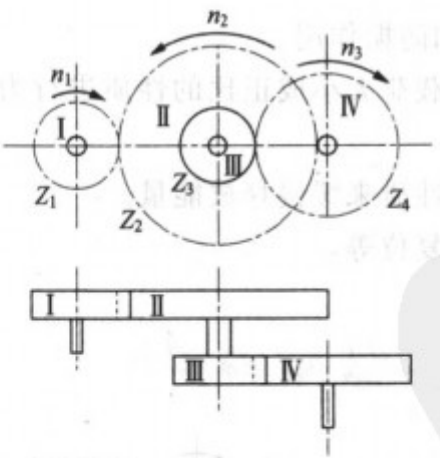


图 2.25　轮　系

在图 2.25 所示的轮系中，各齿轮的齿数分别为 $Z_1=20$，$Z_2=50$，$Z_3=18$，$Z_4=45$。若齿轮Ⅰ的转速为 1200r/min，试求齿轮Ⅳ的转速。

答　定轴轮系的传动比 i = 从动齿轮齿数之积/主动齿轮齿数之积

$$i=\frac{Z_2Z_4}{Z_1Z_3}=\frac{50\times45}{20\times18}=6.25=\frac{n_1}{n_3}$$

$$=\frac{1200}{n_3}$$

则　$n_3=\dfrac{1200}{6.25}=192(\text{r/min})$

篇 外 话

行星齿轮的应用

在瓦特的蒸汽机(1780 年)中就使用了行星齿轮。在已生产了 1500 万台的 T 型福特汽车(1908—1927 年)中安装了使用行星齿轮的半自动变速器。

5 机械制图基础

要点

机械制图必须执行根据日本工业标准(Japanse Industrial Standards,简称JIS)中的制图总则(JIS Z 8310)制定的机械制图标准(JIS B 0001)[译者注:在中国也要执行中国的制图标准(GB)],制图标准规定了机械制图的图样表达方法和尺寸标注方法等。

近来,利用计算机的数据存储、计算和绘图功能来提高设计效率的CAD(Computer Aided Design)软件系统的应用越来越广。

解释

图线的种类

机械制图中常用的图线种类如表2.2所示,按形状可分为实线、虚线、点画线和双点画线等;按线条的粗细可分为粗线条、细线条和中粗线条;按图线的用途可分为如表2.3所示可见线、隐藏线、中心线、尺寸线、尺寸界线、引出线、旋转断面线、断裂线、假想线和剖面线等。

表2.2 线型与线宽

实线	细线 中粗线 粗线	点画线	细线 粗线
虚线	细线 粗线	双点画线	细线

表2.3 线条的种类及用途

根据用途划分的名称	线的种类[3]		线的用途
可见线	粗实线		表示投影对象可见部分的形状
尺寸线	细实线		标注尺寸用
尺寸界线			将要标注的尺寸从图形中引出
引出线			将要标注的文字和符号等引出用
旋转断面线			表示将图形内的该部分的断面旋转

续表 2.3

根据用途划分的名称	线的种类[3]		线的用途
中心线	细实线	———	中心线的省略表示
水平面线[1]			表示水面和油面等位置
隐藏线	细虚线或粗虚线	– – – – – – – –	表示投影对象不可见部分的形状
中心线	细点画线	——·——·——	① 表示图形的中心 ② 表示中心移动的中心轨迹
基准线			表示定位基准
节距线			表示重复图形节距的基准
限定范围线	粗点画线	——–——–——	表示有特殊加工等要求的表面范围
假想线[2]	细双点画线	——··——··——	① 需要将相邻部分作为参考时用 ② 需要将刀、夹具等的位置作为参考时用 ③ 表示可移动部分在移动中的特殊位置或极限位置 ④ 表示加工前或加工后的表面形状 ⑤ 表示画了断面图位置的形状
重心线			连接断面重心的线
断裂线	不规则的细波浪线或双折线	~~~	表示投影对象断裂部分或去掉部分的边界
剖切线	细点画线，在端部和转折处画成粗实线[4]		画断面图时，表示与其对应的断面位置
剖面线	细实线，间隔均匀且相互平行		用于区别被图形限定的特定位置与其他部分，如表示断面图的断面
特殊用途线	细实线	———	① 表示可见线和隐藏线的延长 ② 表示平面 ③ 需要明确表示位置或说明时用
	粗实线	———	用于表示薄壁

1）JIS Z 8316 的规定。

2）假想线不应出现在投影图上，但也在需要简便地表示零、部件时使用。另外，为了帮助理解功能和原理，也作为辅助图形使用。

3）其他线的种类可根据 JIS Z 8312 的规定。

4）在容易与其他用途线混淆时，端部和转折处可不画粗实线。

注：细线、中粗线和粗线的比例为 1∶2∶4。

投影图

将物体的形状表达在纸面上的方法有正投影法、轴测投影法、斜投影法和透视法等。

正投影法 正投影法是利用平行的投射线将物体投射到与投射线垂直的投影面上进行表达的方法。可分为将物体置于第一分角[1]进行投影的**第一角投影法**，和将物体置于第三分角进行投影的**第三角投影法**。日本 JIS 规定机械制图采用第三角投影法[2]。

第一角投影法
第三角投影法

将物体置于第三分角中，分别向物体前方（上方和左侧）的投影面进行投影，可得到三面投影图（**正投影**、**水平投影**和**侧投影**）。

正投影
水平投影
侧投影

第三角投影法的各个视图及其投影方向如图 2.26 所示。

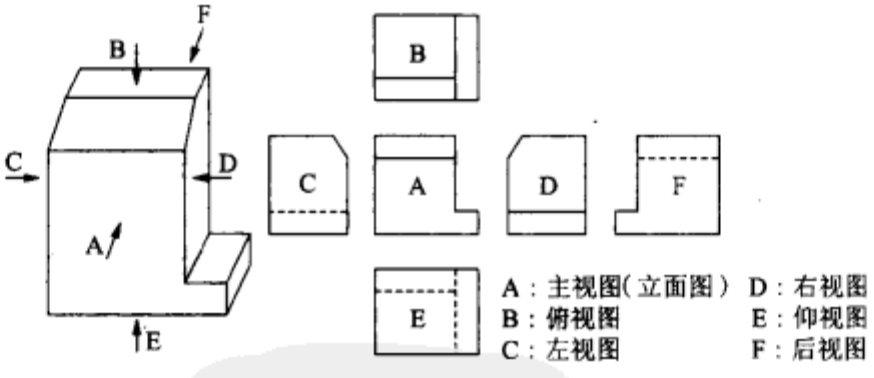


图 2.26 第三角投影法

轴测投影法 轴测投影法是利用一个投影图来表达物体的立体形状的方法，这种投影图立体感强，使识图者能很容易地理解物体的形状。

图 2.27 所示的是**正等轴测图**，图 2.28 所示的是**正二等轴测图**，图 2.29 所示的是**正三轴测图**。

正等轴测图
正二等轴测图
正三轴测图

1）在投影法中用 3 个相互垂直的投影面将空间分为 8 个分角。——译者注

2）中国 GB 规定机械制图优先采用第一角投影法。——译者注

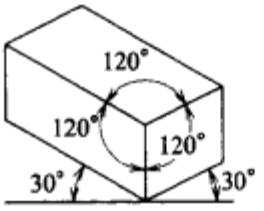


图 2.27　正等轴测图

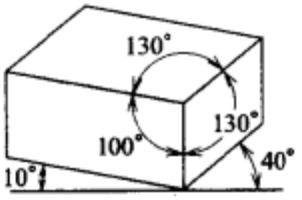


图 2.28　正二等轴测图

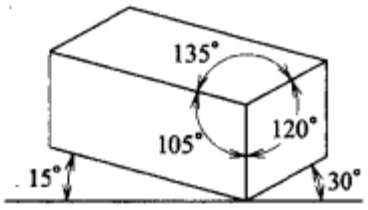


图 2.29　正三轴测图

斜投影法　令 X、Z 轴互相垂直，只有 Y 轴倾斜[1] 所画出的投影图称为斜投影图，这种投影方法称为斜投影法。斜投影图与轴测投影图都具有图形的立体感强和容易理解的特点。

透视法　透视法是具有距离感的图形表达方法。在机械制图中几乎不采用透视法，但在土木建筑等领域的图纸中经常采用。

图　样

机械图样

能够完整地表达工件的形状、尺寸、加工方法和表面粗糙度等加工所需要的工程信息的图纸称为**机械图样**。

在机械图样中，以最能够表达零件形状特点的投影方向为正投影（主视图）的投影方向，对于水平投影图和侧投影图等辅助投影图，只需要画出其中必要的投影图即可，其他的投影图可以省略。在机械图样中应尽量不使用虚线来表达形状。

主视图的确定方法　主视图的确定应该从工件的加工过程来考虑。比如，对于车削加工的工件，应使其中心线处于水平位置，加工的重点部位应该画在右侧；对于刨削加工的工件，应使其中尺寸较大的表面处于水平位置，其主要加工面应在主视图中表达等。

辅助视图（俯视图、左视图等）的确定方法　辅助视图包括左视图、右视图、俯视图和仰视图等几种，在能够准确地表达清楚工件的工程信息的前提下，辅助视图的数量应越少越好。

剖视图的表示方法　当从工件的外部无法看到其内部

1）投射线与 X 和 Z 轴构成的投影面倾斜。——译者注

形状时，可以用假想的剖切面剖开工件，移去剖切面和观察者之间的部分，将其余部分向投影面投影，这样就可以清楚地表达工件的内部形状，这种投影图称为**剖视图**。

剖视图

原则上剖切面应该通过工件的主要中心线，如果不通过工件的主要中心线，应该用符号来表示剖切位置。

对于轴、销、螺栓、螺母、垫圈、螺钉、紧定螺钉、铆钉、键、加强筋、车体的框架及齿轮的轮齿等，当剖切面通过其轴线时，原则上这类零件按不剖切绘制，必要时可以采用局部剖视的方法来表达。

尺寸的标注方法

尺寸标注不仅要表达工件的大小，同时还要给出所需要的精度、加工方法和加工顺序等生产加工信息。

比例 所画出图形的尺寸与实际物体的尺寸之比称为图样的比例(scale)。

在机械制图中，根据需要，人们将绘制图样的比例分为与实物相同的原值比例、放大比例和缩小比例三种，表 2.4 中给出了 24 种标准规定的比例。需要注意的是，无论采用放大比例还是缩小比例，图样中所标注的尺寸必须是工件的实际尺寸。

表 2.4 制图的标准规定比例

比例种数	系列	比 例
缩小比例	1	1∶2　1∶5　1∶10　1∶20　1∶50　1∶100　1∶200
	2	1∶$\sqrt{2}$　1∶25　1∶2$\sqrt{2}$　1∶3　1∶4　1∶5$\sqrt{2}$　1∶25　1∶250
原值比例		1∶1
放大比例	1	2∶1　5∶1　10∶1　20∶1　50∶1
	2	$\sqrt{2}$∶1　2.5$\sqrt{2}$∶1　100∶1

(JIS B 0001:2000)

注：应优先采用 1 系列中的比例。

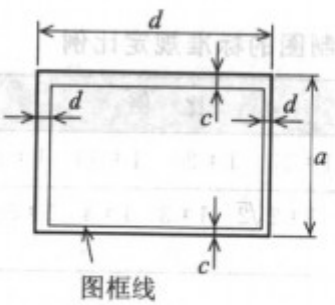
标准图纸幅面尺寸及边框尺寸如表 2.5 所示。

表 2.5　标准图纸幅面尺寸及边框尺寸

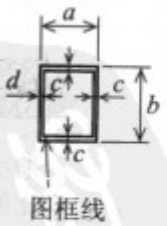
单位：mm

A 列尺寸					延长尺寸				
图号	尺寸 $a\times b$	c（最小）	d（最小）		图号	尺寸 $a\times b$	c（最小）	d（最小）	
			不装订时	装订时				不装订时	装订时
—	—	—	—	—	A0×2	1 189×1 682	20	20	25
A0	841×1 189	20	20	25	A1×3	841×1783			
A1	594×841				A2×3 A2×4	594×1 261 594×1 682			
A2	420×594	10	10		A3×3 A3×4	420×891 420×1 189	10	20	
A3	297×420				A4×3 A4×4 A4×5	297×630 297×841 297×1 051			
A4	210×297				—	—	—	—	—

A0~A4 横放



A4 竖放



(JIS B0001:2000)

注：为了便于图纸的装订折叠，d 部分的装订尺寸放在左侧。

尺寸的单位　标准规定，机械制图标注尺寸的单位原则上是以 mm（毫米）为单位，并在图样上不标注尺寸单位；角度一般以度为单位，必要时可用分和秒表示。

尺寸的标注方法　在尺寸线的两端要画箭头等终端符号，尺寸线不应在标注尺寸数字的地方中断，并且应尽量避免与其他尺寸线相交。

尺寸界线一般应与尺寸线垂直，在无法以垂直尺寸界线标注时，可以用倾斜的平行尺寸界线引出。

图样中标注的尺寸应是最后加工完成的尺寸。

在标注长度尺寸时，水平尺寸线上的尺寸数字应该标注在尺寸线的上方，垂直尺寸线上的尺寸数字应该标注在尺寸线的左侧。标注角度值时，角度数字的方向应以通过角度顶点的水平线为基准，如果标注数字的位置在水平线上方时，数字应朝向外侧；如果标注数字的位置在水平线下方时，数字应朝向内侧(GB规定角度值水平写)。

尺寸中使用的符号 为了清楚地表达工件的形状，从而简化图样，常采用如表2.6所示的标注尺寸符号来表达工件形状。

通常，这些符号要写在尺寸数字之前，符号的大小与尺寸数字的大小相同。但表示圆弧长度的符号时应称注在尺寸数字的上方位置。

表2.6 标注尺寸的符号

符号	发音	符号的意义	符号	发音	符号的意义
ϕ	斐	直径	SR	爱斯阿	球面半径
□	正方形	正方形边长	C	斯依	倒角
R	阿	半径	t	替	板厚
$S\phi$	爱斯斐	球面直径	⌒	弧长	圆弧长度

尺寸公差

在加工零件时，人们通常不可能完全准确地达到一个规定的尺寸，其间必然要存在一定的加工误差。因此，必须根据工件的使用要求，以基本尺寸为基准，适当规定允许的尺寸变化范围。在允许的尺寸变化范围内，最大的尺寸称为**最大极限尺寸**，最小的尺寸称为**最小极限尺寸**。最大极限尺寸与最小极限尺寸之差称为**尺寸公差**(tolerance of size)。

最大极限尺寸
最小极限尺寸
尺寸公差

在JIS标准中，人们按尺寸公差的大小分为IT1～IT18等18个精度等级。将这些精度等级中规定的尺寸公差称为**标准公差**。其中，对于孔的IT6～IT10和对于轴的IT5～

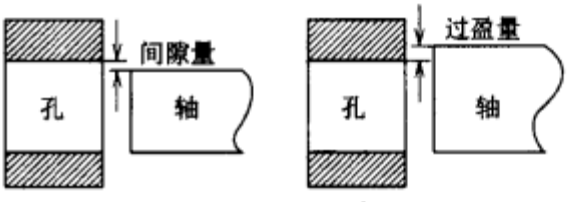
标准公差

IT9 是加工中常用配合的标准公差。

配　合

配合
间隙　过盈
间隙配合
过盈配合

轴与孔之间的嵌入关系称为**配合**(fit)。如图 2.30 所示,由于孔与轴的尺寸公差不同,因而可能出现**间隙**或**过盈**。存在间隙的配合称为**间隙配合**,存在过盈的配合称为**过盈配合**。



(a) 间隙配合　　(b) 过盈配合

图 2.30　配　合

CAD 机械制图

CAD 制图

基于 CAD 的制图,根据出图的要求和精度的不同所制出的图是有较大区别的。对于使用大型计算机的 CAD 系统不在此阐述之列,这里将要介绍的是使用如图 2.31 所示的台式个人计算机的 CAD,这种 **CAD 制图**的目标是替代手工制图。"CAD 机械制图"的标准(JIS B 3402)是以基本的机械制图标准为基础制定的。需要特别注意的是:CAD 制图不能与手工绘图的标准混淆;需要注明所使用的 CAD 软件系统;允许使用非标准比例的图面等。另外,线型的长度是使用《CAD 制图用图线》(JIS Z 8321)标准中规定的计算值。

CAD 系统概述

如图 2.31 所示,CAD 系统是由数据处理设备(计算机)与外围设备组成的硬件(hardware)和进行设计与绘图所需要的软件(software)构成。启动 CAD 软件需要有操作系统。

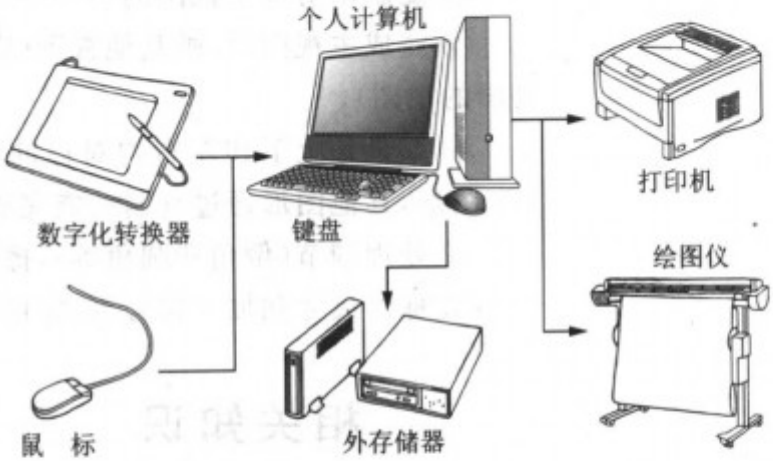


图 2.31 CAD 系统的硬件组成

二维(平面)CAD

这种 CAD 制图主要是为工厂提供零件图和装配图,是以绘图仪输出为主。所以,适用于不要求输出三维数据和不需要直接 NC 程序化的场合,这种软件系统规模小,经过短期培训即可上机操作。

基本功能

CAD 的基本功能可以分为以下 5 种,还可进一步细分为 20 个子功能,其总的功能数超过 100。这些功能均是通过下拉式菜单调用。

① 绘图功能。从绘制直线和曲线到文字输入,这也是其主要的功能。

② 图形编辑功能。包括移动、复制、变形和擦除等可简单操作的功能。

③ 图形属性功能。有图线的种类、颜色、线宽和图层操作等。

④ 图面管理功能。有图形调用、外部参照、图形输出和填写零件等。

⑤ 自动测量计算功能。测量尺寸、面积、周长、距离和角度,以及计算体积和质量等。

绘图步骤

① 绘制轴线或基准线。

② 绘制对称主视图的一半图形。

③ 复制出对称主视图的另一半图形。

④ 完成主视图后，画其他视图(应根据具体情况确定先要画的视图)。

⑤ 如果是上下和左右均对称的图形，只需绘制视图的1/4图形，其他图形通过复制功能完成。

⑥ 处理细节(倒角和圆角等)，擦除不需要的线。

⑦ 标注尺寸和加工符号等，完成图纸绘制工作。

相关知识

◆图　层

在CAD软件中已经设置了许多幅可以认为是透明的图面，称为图层(layer)。每个图层都有自己的编号或名称，均可以设置为单独绘图、编辑或不显示等模式。例如，在绘图过程中画出的基准线或辅助线等，以后不需要时也不必擦除，只要将该图层关闭，在图形输出时就不会被打印。另外，每个图层还可以设置颜色等属性，所以每张零件图的颜色都可以改动。这样，在由零件图拼画的装配图上，就能够很容易地区分出各种零件。

◆三维CAD功能

① 绘制三维图形的功能。当赋予平面图形以厚度或进行拉伸和扫描等操作后，就可在平面的上方、下方或上下对称地构造出立体形状。也可以将平面图形绕某一轴线旋转，形成回转体形状。

② 三维图形的编辑功能。通过尺寸驱动改变图形。

③ 显示三维图形的功能。可以表达如图2.32所示的三维实体模型，并可对该实体进行布尔运算。

◆三维CAD软件的特点

通常，CAD可采用如图2.32所示的三种模型来表达立体形状，但要根据软件的性能决定可使用的方式。只能处理线框模型的软件就不能显示表面模型和实体模型。

① 线框模型。将立体的外轮廓用线来描述，可快速显示图形。

② 表面模型。定义了立体的表面，可对表面进行着色和颜色过渡等处理。

③ 实体模型。具有体的特征，可对其作切割和组合等操作，旋转后也不会变形。

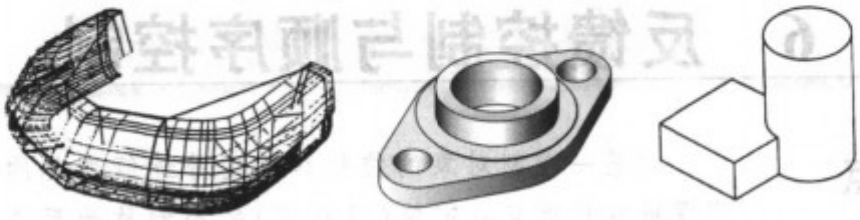


图 2.32 三维实体模型

◆ **CAD 制图的特点**

① 可以缩短绘图时间。

② 绘图精度高，图面质量好。

③ 对图纸的修改方便，灵活性强。

④ 图纸的存储和检索效率高。

⑤ 容易实现图纸的再利用，促进图纸设计的标准化。

◆ **CAD/CAM**

在使用三维 CAD 系统进行设计时，根据设计者输入的信息，计算机会自动构建设计对象的模型，并以此作为依据进行计算和图形处理。另外，还可以对各部件的相互干涉和加工刀具的运动轨迹进行模拟仿真检查，并将结果在显示装置上以二维或三维图形方式输出。

CAM 软件是利用从 CAD 系统得到的数据，模拟加工时刀具的运动，并在对模拟结果进行分析的基础上，自动生成数控机床的控制数据。有时也直接将数据传送到数控机床上进行加工。这种设计、制造一体化的系统称为 CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing，计算机辅助设计和制造)。将 CAD 系统的设计信息直接用于制造，可以使从设计到制造的整个过程更加合理，效率更高，从而大幅度地缩短产品的设计、生产周期。

6　反馈控制与顺序控制

要　点

对某一控制对象的位移和速度等连续变化的物理量实现保持或趋近某一定值(目标值)的控制称为反馈控制。而对多个操作依次自动实现启动或停止的控制称为顺序控制。

解　释

术语的来源

反馈

英文的**反馈**一词 feedback 中前缀 feed 的意思是“提供食物,供给燃料等”,将 feed 与 back 连起来就是反向提供信号、信息的意思,是控制领域的专用术语。

英文中 sequence 一词是顺序的意思,在纸牌游戏中,连续发出一套牌叫做 sequence。当控制过程为按顺序连续控制时,就称为顺序控制。

控制的概念

启动指令

以自动洗衣机为例,向洗衣机的水桶内注水的过程只是整个顺序控制过程的一个步骤。首先要给出**启动指令**,然后再判断是否满足“水桶内无水”、“排水阀已关闭”等条件,当条件满足时,打开进水阀,开始注水。

停止信号
启动信号

当检测到满水位信号时,发出注水的**停止信号**(关闭进水阀),同时发出搅动轮旋转的**启动信号**,使搅动轮电机开关接通。在发出搅动轮电机启动信号的同时,还要发出计时器的置位信号,由计时器的计时终了信号切断搅动轮电机开关。

溢流
反馈控制

而在“漂洗”时,洗衣机要一边流水一边搅动,还必须保持一定的水位。对于一般的洗衣机来说,只要水没有从洗衣机中溢出就可以,所以通常采用**溢流**的方法来维持水位恒定,但是在对水位要求十分严格的场合,就需要采用**反馈控制**。

传感器
流量控制阀
设定值

因为采用反馈控制是对连续量进行控制,所以需要有能够确定从桶底到上面任何位置的水位**传感器**,水阀也必须是能够调节流量的**流量控制阀**。根据当前水位与**设定值**之差来控制进水流量就可以使水位保持不变。

当改变水位的设定值，发出从原来平衡状态的水位向新水位变化的指令时，就要调节流量，使水位迅速达到新的平衡状态；当水位由于某种外界原因（也称为**干扰**）突然发生变化时也要调节流量，使水位返回到原来位置，这些控制过程都是反馈控制。

干扰

反馈控制的作用

反馈控制的目的是使被控制量保持一定值，按控制目的可以将反馈控制分为**定值控制**和**跟踪控制**两类。

定值控制

跟踪控制

定值控制 控制目标值保持不变的反馈控制称为定值控制，在生产实际中常见的液位、流量、温度、压力和浓度等控制过程都属于定值控制。

跟踪控制 随着时间的变化，控制目标值也发生变化的反馈控制称为跟踪控制。在跟踪控制中，目标值呈不规则变化的称为**随动控制**，目标值的变化规律事先已经确定的称为**程序控制**。为了与其他类型的控制相区别，通常将对物体的位置或角度等进行随动控制的系统称为**伺服系统**。

随动控制

程序控制

伺服系统

顺序控制的作用

在顺序控制中，已经事先确定了应该控制的顺序，一旦达到了某一**状态值**就认为该时刻、该阶段的**控制结束**，开始进入下一个控制阶段的控制。在达到某一状态值，并发出控制**结束信号**之后，就不再进行修正，直接转入下一个控制阶段。譬如，在进行移动控制时，只需控制其是否达到某一控制点，而不必连续控制其正确的位移量。这一点是顺序控制与反馈控制的最大区别。

状态值

控制结束

结束信号

在顺序控制过程中；人们是采用开关或阀门等对执行装置和其他设备依次进行启动和停止控制的，所以在某一顺序控制阶段中，也可以采用反馈控制来实现混合控制。以自动加工机床为例，更换刀具时采用顺序控制，而实际加工过程则利用伺服装置实现位置控制。加工结束后，再返回到顺序控制的程序，完成退刀、取出工件和安装新的毛坯等操作。

在控制精度要求较低的工艺过程中，可以完全采用顺

序控制，而在精度要求较高的环节上可以插入反馈控制，使两者有机地结合起来，分别发挥各自的特点。

题外话

检测与控制

在考虑控制问题时，必须清楚地认识到检测技术与控制技术之间的密切关系。

检测就是将物理现象或物理量以定量的形式表达出来，检测结果可以用于控制过程。

控制就是为了达到某种目标，进行必要的操作的过程。由于控制对象不同，与检测方法和检测精度等密切相关的控制系统也大不相同。

7 反馈控制系统的构成

要 点

在反馈控制系统中，由检测控制结果的检测装置和将检测结果与设定值进行比较的比较器构成一个反馈环节，通过反馈环节使控制系统实现了封闭的控制回路，所以这种反馈控制也称为闭环控制。

解 释

设定值
比较器 偏差
误差信号
控制器
执行装置
被控对象
检测装置

反馈控制系统框图

如图 2.33 所示，当通过指令信号给出**设定值**时，在**比较器**中求出设定值与当前值的差值（**偏差**），将该差值作为**误差信号**，在**控制器**中作出误差修正，生成执行控制量。将这种控制量输入到**执行装置**就可以得到对**被控对象**的控制输出量。被控制对象当前值的变化直接由**检测装置**检测出来，反馈到比较器上。

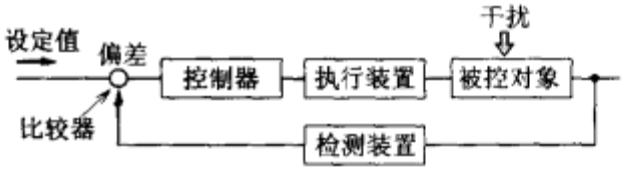


图 2.33 反馈控制系统框图

电动伺服装置的构成

指令值
驱动器
位移传感器
比较器
误差信号

图 2.34 是由伺服电机和进给丝杠组成位置控制机构的实例。首先，将位移量作为**指令值**给出，在控制器中产生作为执行控制量的速度指令。**驱动器**接受这个速度指令后，经电力放大器提供给伺服电机能量，驱动电机开始旋转，通过与电机相连的进给丝杠带动工作台开始移动。在工作台移动的过程中，安装在工作台上的**位移传感器**就可以检测出工作台的移动位置，并反馈到**比较器**。比较器不断地向控制器输出**误差信号**，直至指令值与移动位置之差减小到 0 为止。当然，如果工作台的位置超过了指令位置，就要产生反方向的速度指令来进行校正。

要检测工作台的坐标值，必须采用位移传感器，一般可

以采用电感式位移传感器或磁栅尺等位移传感器。但在比较简单的机构中，常在进给丝杠上安装**脉冲编码器**，通过检测脉冲来实现反馈控制。这时的控制量不是工作台的位移，而是电机的**旋转角度**。这也是一种常用的控制方式。

脉冲编码器

旋转角度

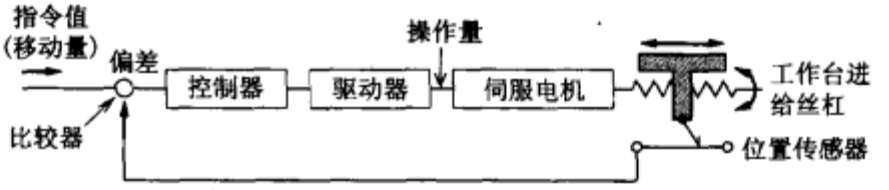


图 2.34　电动伺服机构的构成

油压伺服装置的构成

仿形加工装置

图 2.35 是采用液压伺服控制的**仿形加工装置**。

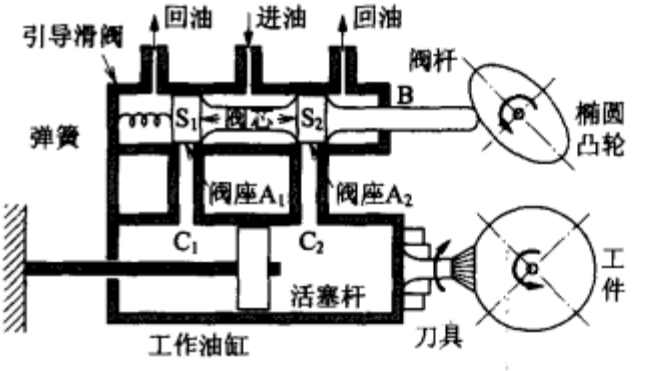


图 2.35　液压伺服控制仿形加工装置

椭圆凸轮

活塞

引导滑阀

阀芯　阀座

液压油

工作油缸

图中的**椭圆凸轮**处于平均半径的位置，下面驱动油缸内的**活塞**也处于中间位置。

驱动凸轮开始旋转，凸轮的长径部分使**引导滑阀**的阀杆 B 向左移动，**阀芯** S_1 相对**阀座** A_1 的位置发生偏离，**液压油**流入**工作油缸**的左腔 C_1。由于该系统的工作油缸的活塞杆是固定的，所以工作油缸向左移动。此时，由于工作油缸和引导滑阀为整体结构，所以引导滑阀也跟着向左移动，结果使阀座 A_1 与阀芯 S_1 之间的间隙变小，这恰好符合反馈控制原理。当间隙变为 0 时，工作油缸也停止移动。

当凸轮转到短径位置时，阀杆 B 在弹簧的作用下向右移动。S_2 与 A_2 之间的间隙增大，使液压油流入工作油缸的右腔 C_2，刀具也随着向右移动。

指令值

在这种机构中，**指令值**（即设定值）就是由凸轮确定的

引导滑阀中阀芯的移动量，控制的结果就是刀具相对工件的左、右移动量。引导滑阀的运动为**反馈量**，阀座 A_1、A_2 相对阀芯 S_1、S_2 的偏移相当于**比较器**。**控制量**也就是通过阀间隙流入油缸腔内的液压油量。该系统的检测装置、比较器、控制器和驱动器全部为一体化结构。

反馈量
比较器　控制量

现代控制理论

反馈控制理论是以**线性系统**为前提，无法对**非线性系统**和**多变量系统**进行控制，因而被称之为古典控制理论。

但是，对于许多非线性系统，在某一较窄的变化范围内都可以认为是符合线性关系的，所以，在大多数情况下都可以通过近似的线性模型实现反馈控制。

现代控制理论是对系统的可控性和稳定性进行分析，从而设计最佳控制系统的方法。利用**状态变量**来表示控制变量，通过**评价函数**来求得最佳控制量。

线性系统
非线性系统
多变量系统
现代控制理论
状态变量
评价函数

相关知识

◆ 模糊控制

模糊控制是近些年发展起来的控制技术之一。严格地说，模糊控制属于反馈控制的一种方法。模糊控制就是将具有控制对象一定性质的样本集合作为模糊集合，利用模糊理论推理，并进行定量化（含有一定的模糊成分）的计算，最后求得最佳控制量的控制方法。

◆ 鲁棒控制

在一般的反馈控制系统中，如果控制系统的特性发生变化，就有可能产生较大的偏差，甚至出现突然失控等现象。

鲁棒（robust）控制是在控制系统即使特性稍有变化时，也不会改变控制性能的一种控制方法，具有较强的矫顽能力。

◆ 自适应控制

实际使用的自适应控制有模型参考自适应控制和自校正控制。

◆ 神经网络控制

构建人工智能（AI）的神经网络，通过利用神经网络的自学习能力，将控制规则图形化并加以记忆。随着不断的学习来提高控制精度。

题外话

逆变控制与 PWM 控制

通过可控硅等半导体技术，可以将商业用的交流电转变为任意的频率和矩形波。将其应用到电车、日光灯和空调等中可提高工作效率。另外，通过微机控制，可输出任意脉冲宽度的矩形波。它通常被用于直流电机速度的无线控制，转角控制也可使用 PWM 控制。

8　反馈控制系统的特性

要　点

性能优良的控制系统的标志是能够“准确、快速、稳定”地逼近控制目标值。

解　释

响应与特性

设定值
干扰

由于反馈控制系统的输入信号只有**设定值**和外界的**干扰**两种，所以，可以仅针对这两种信号来分析系统的特性与响应。

过渡状态
瞬态响应
稳定状态
稳态响应

图 2.36 所示为某一控制系统当目标值突然发生变化时的输出响应曲线。曲线左半部分表示的是**过渡状态**的**瞬态响应**，右半部分表示的是**稳定状态**下系统达到平衡时的**稳态响应**。因为从系统的过渡响应和稳态响应中分别可以得到过渡特性和稳态特性，因此在控制领域认为响应和特性具有同样重要的意义。

动特性
静特性

将系统的特性按时间过程进行划分，可以分为**动特性**和**静特性**，稳态特性是静特性，而过渡特性属于动特性。在动特性中，除了过渡特性以外，还包括频率响应特性，实际上它们都是相似的特性。

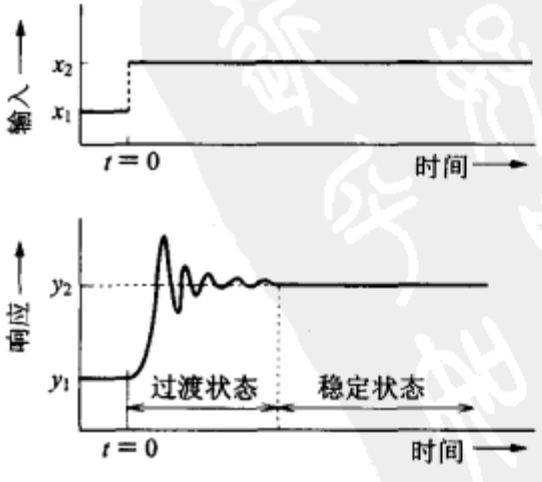


图 2.36　控制系统的响应曲线

稳态特性

稳态偏差
静态误差
传递函数

控制系统最终达到的控制值(也称为最终稳态值)与设定值之差称为**稳态偏差**或者**静态误差**。稳态偏差越小,系统控制精度越高。实际系统的稳态偏差值可以利用**传递函数**求得。

过渡特性

阶跃响应
过渡响应
响应速度

如图 2.36 所示,控制系统在阶跃型输入信号的作用下所得到的输出特性曲线称为**阶跃响应**或者**过渡响应**。对于系统的过渡响应,具有决定性的评价指标是**响应速度**的快慢。

一阶延迟

如果控制系统是由若干个积分环节和**一阶延迟**环节组成的,那么这些独立环节的过渡响应综合起来将影响整个控制系统的过渡响应。因此,对于整个控制系统,要改善其过渡响应特性,必须知道各个环节的过渡响应特性。实际应用的反馈控制系统几乎都是二阶以上的高阶延迟控制系统。

二阶延迟
超调量
调节时间

图 2.37 所示的是某一个**二阶延迟**系统的过渡响应的例子。图中曲线的上升阶段反映了系统的响应速度。**超调量**称为系统的动态误差,它是系统调节强度的标志。**调节时间**当然也是系统响应速度的指标,同时还是系统稳定性的标志,因为即使上升速度很快,超调量很小,但若振荡的衰减特性很差,那么系统的调节时间也会相对很长。

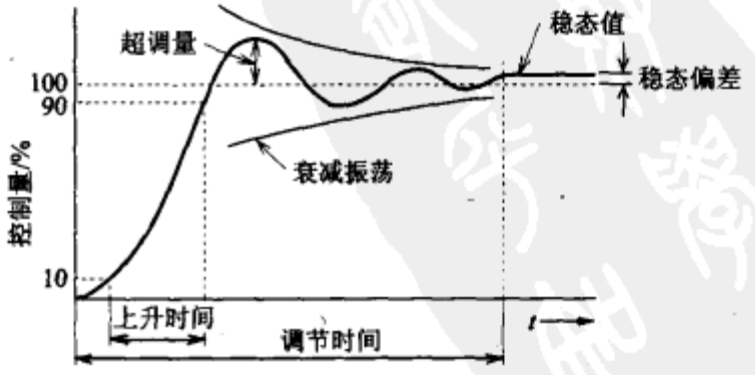


图 2.37　二阶延迟系统的过渡响应

稳定性

稳定性

稳定性可分为过渡特性中的稳定性和频率响应特性中

的稳定性。在过渡响应中，调节时间的长短是稳定性的标志，因为有无调整强度的超调量，以及由于超调而导致的振荡是收敛性的还是发散性的，这些是划分稳定和不稳定的界限。

频率响应

频率响应

除了从过渡特性来研究系统的稳定性以外，**频率响应**特性也是判别系统稳定性的一种方法。频率响应就是当给系统输入不同频率的正弦波输入信号时，检测到的系统输出振幅的稳态响应和输出相位的滞后量。由此可判断出系统的跟踪特性，它是控制系统的控制精度和稳定性的标志。

奈奎斯特稳定判别法

伯德图稳定评价法

利用频率响应判断系统稳定性的方法有**奈奎斯特**(Nyquist)**稳定判别法**和**伯德**(Bode)**图稳定评价法**等。

相关知识

◆ 反馈控制实例

内部装有计算机、灵活性很强的数控(NC：Numerical Control)机床称为CNC(Computerized Numerical Control)机床，还有的NC机床称为加工中心(MC：Machining Center)机床。在这些数控机床上，从设计制图到生成NC数据代码，完全可以利用计算机辅助系统(CAD/CAM)来完成，可以加工出形状复杂、精度很高的工件。

CNC机床是利用机电一体化技术的典型产品。

题外话

反馈控制理论的产生

1915年，美国架起了从纽约到旧金山的电话线，也就是说，从大西洋到太平洋首次接通了电话线。当时为了解决由于衰减而导致信/噪(S/N)比下降的问题，建立了6个中继站。对这些中继站的放大器，人们当然希望其噪声和失真都要很小。

1927年，贝尔研究所的H. S. 布莱克(Black)发明了反馈放大器。这种放大器是将输出信号负反馈到输入信号中，存在一定的不稳定性。后来，ATT的工程师H. 奈奎斯特从理论上(数学上)解释了存在这种不稳定性的原因。他利用复变函数论的理论进行推导，1932年发表了题为"反馈放大器的稳定性问题"的论文。该篇论文是针对放大器的频率特性来进行稳定性判别的纯理论研究，但后来开始用于放大器的设计中，逐渐发展成为实用的控制理论。这种奈奎斯特稳定性理论，至今仍是古典控制理论的核心。

后来，贝尔研究所的H. W. 伯德继承并发展了反馈控制理论，提出了伯德图。随着第二次世界大战的爆发，反馈控制理论被用于大炮、雷达等军备的伺服装置中。第二次世界大战之后，麻省理工学院(MIT)成为此项研究的中心。

9　顺序控制基础

要　点

顺序控制的实质，是对“顺序”及“时间”进行控制。

解　释

顺序控制系统的结构

图 2.38 所示为顺序控制系统的结构框图。在这里，系统所发出的指令几乎都是启动某项作业的命令。命令处理装置按预先规定的指令执行顺序向各执行装置发出相应的控制命令后，执行装置控制各执行机构实现具体的 ON、OFF 操作，从而使被控对象发生某种状态变化。

图 2.38 所示的检测部分是用于输出执行机构是否达到预想状态的**二值信号**。这些二值信号通常表示作业是否结束、移动的位置或定时时间是否到达等指示性信息。

二值信号

在顺序控制系统中，几乎所有的指令都是通过按键输入的，命令处理装置的输出一般多于一个。当有多个输出时，就需要产生输出信号的组合。而这种组合在逻辑上是预先设定好的，属于命令处理的一部分。

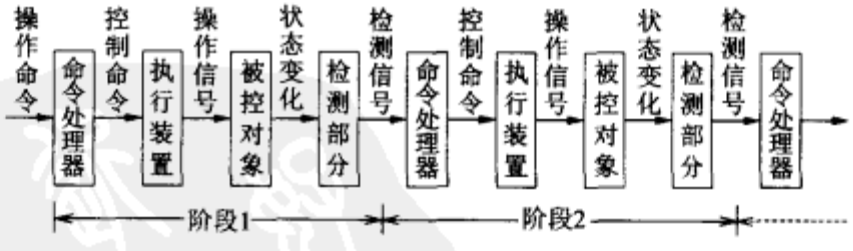


图 2.38　顺序控制系统的结构框图

组合逻辑

在顺序控制系统中，控制指令通常都是指示某项作业的开始信号，由此产生各阶段的开始信号和作业的结束信号。因此，需要复杂的**组合逻辑**，才能实现上述各项功能。

组合逻辑

在具体的电路中，AND、OR、NOT、NAND、NOR 等是基本逻辑单元，通常利用定时器将这些基本逻辑单元进行组合，构成有时间顺序的逻辑电路。

要想由输入信号得到所需要的输出信号，关键是如何

组合各逻辑单元。为了能够使用最少的逻辑单元构成电路，常常需要利用**布尔代数**将逻辑表达式进行某些变换和化简处理。

布尔代数

时序逻辑

时序逻辑就是通过事先确定的控制顺序程序，将各个阶段的控制顺序固定下来。整个顺序控制程序从开始到结束，并不要求各个阶段都是单线顺序控制，可以根据条件设定几个分支，构成多条路径的控制方式。

时序逻辑当然要明确地表示出控制顺序在时间上的前后关系。为了使各个阶段的前后关系更简洁、准确，通常使用**时序图**来描述。

时序图

条件控制

根据事先规定好的条件进行逻辑判断，确定顺序控制的执行流向。为了能够实现时间上的前后关系、判断和互锁等安全保护措施，希望能够预先设定好条件控制。在具体的电路中，通常由复杂的逻辑电路、锁存器等具有记忆功能的单元电路来实现条件的逻辑判断。

时间控制

在顺序控制系统中，一旦将控制权交给执行装置后，检测装置只能够检测出操作的结束状态，不能检测出这段时间内的中间状态。为此，还需要采用**定时器**来进行辅助的**时间控制**，对执行机构的超时执行等情况进行处理。

定时器

时间控制

相关知识

◆ 可编程序控制器

将需要用继电器构成顺序控制的电路用具有继电器功能的逻辑单元替代，这种计算机化的器件称为可编程序控制器(PC：Programmable Controller)。其中也有一些 PC 产品就直接称为顺序控制器。

一般的顺序控制系统是由图 2.39 所示的梯形图表示，PC 也是按同样的方式表示顺序控制的电路。但是在一般的顺序控制系统中要使用工具对开关端子和继电器励磁线圈等进行配线，而在可编程序控制器上只要按照控制顺序

进行编程即可。

初期的 PC 只有开关输入、继电器输出这一种形式。现在则可以选择集电极输入、SSR 输出、TTL 输出等多种形式，而且有内含逻辑单元数从几十个到几千个的多种型号。

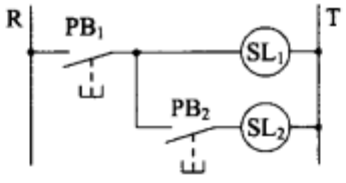


图 2.39 梯形图示例

10 直流电路基础

要 点

机电一体化涉及的电路几乎都是直流电路。在定量求解直流电路中的电压和电流关系时，要使用欧姆定律和基尔霍夫定律。

解 释

电 流

电荷

物质中的电子具有能够形成电流的**电荷**，电荷的单位是C(coulomb，库[仑])，一个电子约为1.602×10^{-19}C。在导体中流动的电荷叫电流，电流的单位是A(ampere，安[培])。1A定义为“1秒钟在某一导体的截断面上流过1C的电荷量”。

欧姆定律

欧姆定律

如图2.40所示，“如果在电阻的两端外加一电压，则流过该电阻的电流大小与所加的电压成正比，与电阻的阻值成反比”，这一规律称为**欧姆定律**(Ohm's law)，可由下式表示：

$$I=E/R$$

式中，电压E的单位为V(伏[特])；电流I的单位为A(安[培])；电阻R的单位为Ω(欧[姆])。

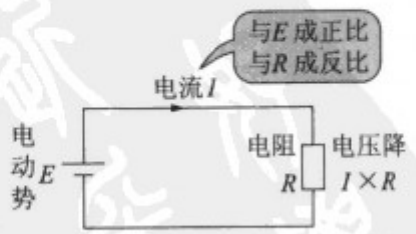


图2.40 欧姆定律

此外，当电阻R上流过电流I时，会在电阻的两端产生$R\times I$(V)的电位差，这个电位差也称电阻产生的电压降。

基尔霍夫定律

基尔霍夫定律

在**基尔霍夫定律**中，有关于电流的定律(第一定律)及关于电压的定律(第二定律)。

基尔霍夫第一定律 基尔霍夫第一定律表述为“在电

路网络中任一节点上，流入节点的电流之和与流出该节点的电流之和相等”。如图 2.41 所示，若流入节点的电流为 I_1、I_2、I_3，流出节点的电流为 I_4、I_5，则有如下的等式：

$$I_1+I_2+I_3=I_4+I_5$$

基尔霍夫第二定律　基尔霍夫第二定律表述为“电路网络中任一闭合回路上沿一定方向的电动势之和与电压降之和相等”。

在图 2.42 所示的电路中，假设两个相邻节点之间的电流分别为 I_1、I_2、I_3，按 a、b、c、d、e、f、a 的顺序绕闭合回路一周，则电动势之和为 $E_1+(-E_2)$（当绕行方向与电动势或电流方向相同时取“+”值，否则取“−”值）。回路中的电压降之和为 $R_1I_1+(-R_2I_2)$，由于电动势之和与电压降之和相等，因此可得

$$E_1-E_2=R_1I_1-R_2I_2$$

电动势是将电位升高，电压降是将电位降低，因此该定律可作如下比喻：“从某一点出发，翻越几座山返回出发点时，攀登的高度与下降的高度是相等的”。

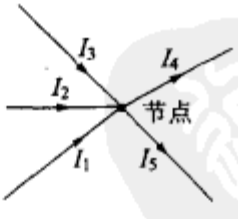


图 2.41　基尔霍夫第一定律

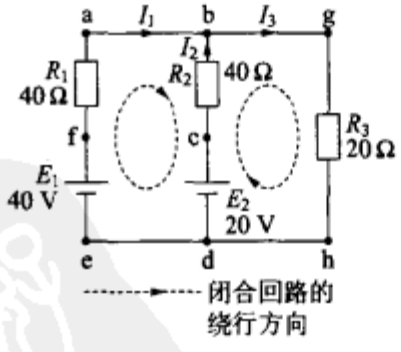


图 2.42　比较复杂的电路

例　题

参考图 2.42 回答下列问题。

① 列写出关于节点 b 的基尔霍夫第一定律方程式。

② 利用基尔霍夫第二定律，列出闭合回路 a—b—c—d—e—f—a 及 b—g—h—d—c—b 的方程式。

③ 根据①、② 的结果，求解流过回路的电流 I_1、I_2、I_3。

答　① $I_1+I_2=I_3$　　(2.1)

② 按顺时针方向绕闭合回路 a—b—c—d—e—f—a 一周，电压降之和为 $R_1I_1-R_2I_2$，电动势之和为 E_1-E_2，因两式相等，由此可得

$$40I_1-40I_2=40-20=20 \tag{2.2}$$

按同样方法，可得出有关闭合回路 b—g—h—d—c—b 的方程式

$$40I_2+20I_3=20 \tag{2.3}$$

③ 将由基尔霍夫第一、第二定律所得的表达式(2.1)、式(2.2)、式(2.3)联立(式(2.2)、式(2.3)的两边同时除以 20)得到

$$I_1+I_2=I_3,\quad 2I_1-2I_2=1,\quad 2I_2+I_3=1$$

解这个方程组可得 $I_1=0.625\text{A}$，$I_2=0.125\text{A}$，$I_3=0.75\text{A}$，由于所得结果中没有负号，所以，假设的电流方向与实际方向一致。

篇外话

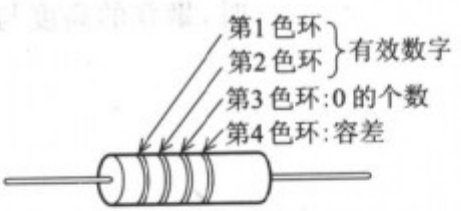
电阻的色环编码

在表示固定电阻的阻值时，常采用色环来表示，即用色环替代数字来表示电阻的阻值及容差。

普通电阻如图 2.43 所示，用 4 条色环表示其阻值及容差。前 3 条色环表示阻值，最后一条色环表示容差。在图 2.43 中，还列出了色环颜色与所代表数字的对应关系。例如，若某电阻的色环为红、橙、黄、红，则它所表示的数字为 2342，注意第 3 位 0 的个数，所以该电阻的阻值为 $23\times10^4=230\text{k}\Omega\pm2\%$。

高精度电阻是用 5 条色环表示的，其中前 4 条用于表示阻值。

电极电阻用 3 位数表示，前 2 位是有效数字，第 3 位是 0 的个数。如 473 为 47 000，即 47kΩ。



颜　色	阻　值		许容差/%
4色码	第1色环，第2色环	第3色环	第4色环
5色码	第1色环~第3色环	第4色环	第5色环
黑	0	0	
棕	1	1	±1
红	2	2	±2
橙	3	3	
黄	4	4	
绿	5	5	±0.5
蓝	6	6	±0.25
紫	7	7	±0.1
灰	8	8	
白	9	9	
金		10^{-1}	±5
银		10^{-2}	±10
无色			±20

图 2.43　电阻的色环编码

11 磁场与电场基础

要 点

磁场与电场的关系极为密切，将机械能转换成电能的发电机和将电能转换成机械能的电动机就是利用磁场与电场的相互关系的典型例子。另外，电感线圈和电容器也在电路中起到重要的作用。

解 释

磁 场

将磁力作用的空间称为磁场(magnetic field)。如果用不带磁的铁片接近磁铁的N极，那么，铁片离磁铁近的一端为S极，另一端就为N极。将这种现象称为**磁感应**(magnetic induction)。

磁感应

安培右手螺旋定则

如图2.44所示，“若电流方向与右旋螺钉的前进方向相同，则电流所产生的磁场方向就与螺钉前进时的旋转方向相同”。这一定则称为**安培右手螺旋定则**(Ampere's right handed screw rule)。电流产生的磁场强度可用**毕奥-萨伐尔定律**(Biot -Savert law)和**安培回路定律**定量地求出。

安培右手螺旋定则

毕奥-萨伐尔定律

安培回路定律



图2.44 安培右手螺旋定则

弗莱明左手定则

弗莱明左手定则(Fleming's left-hand rule)指出了磁场对其中流过电流的导体会产生作用力(**电磁力**)，可以将电能转化为机械能。如图2.45所示，“令左手的食指、中指、拇指互成直角，若中指指向电流的方向，食指指向磁场的方向，则拇指指向的就是磁场对导体施加的磁力方向”。

弗莱明左手定则

电磁力

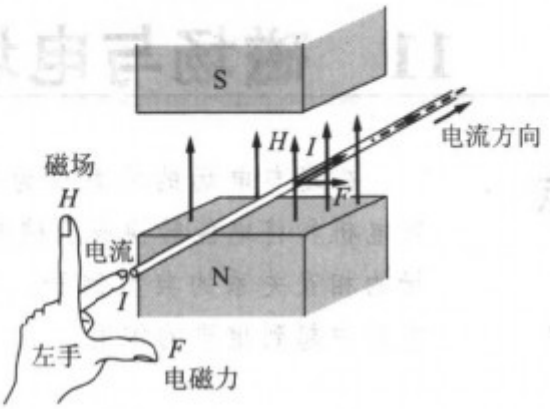


图 2.45　弗莱明左手定则

弗莱明右手定则

弗莱明右手定则

弗莱明右手定则(Fleming's right-hand rule)说明了由机械能转化为电能的原理。如图 2.46 所示，弗莱明右手定则可以表述为“令右手的食指、中指、拇指互成直角，若拇指指向导体的运动方向，食指指向磁场方向，则中指指向的就是导体中产生的电动势方向”。这就是发电机的原理，电动势(e)的大小与导体垂直横切的磁力线根数成正比。

磁通密度

如果设图 2.46 中的导体长度为 l(m)，**磁通密度**为 B(T，特[斯拉])，速度为 v(m/s)，则有

$$e = Blv\sin\theta(\mathrm{V})$$

磁通密度与磁场强度的关系可以表达为

$$B = \mu H$$

磁导率

式中 μ 为**磁导率**，单位是 H/m。

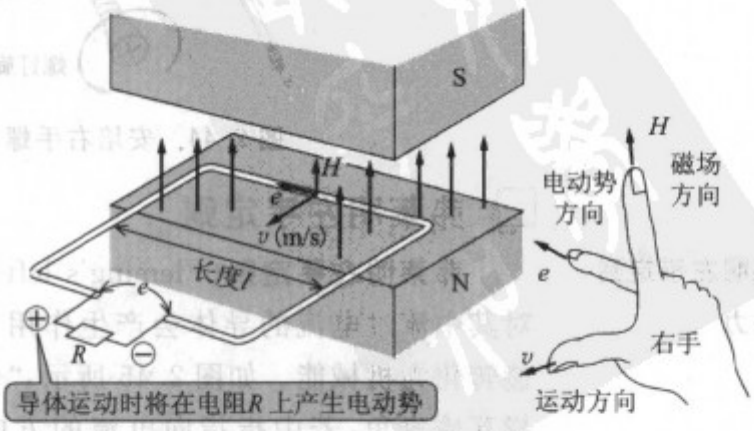


图 2.46　弗莱明右手定则

电磁感应与自感应

感应电压
感应电动势
楞次定律
法拉第电磁感应定律

如果磁铁在圆形线圈中移动，那么在线圈的两端就会产生**感应电压**(induced voltage)或**感应电动势**(induced electromotive force)。感应电动势的方向与磁通变化的方向相反(**楞次定律**)，且与线圈的圈数和磁通随时间的变化率之积成正比(**法拉第电磁感应定律**)，可用下面的式子表达：

$$e=-N\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\ (\mathrm{V})$$

自感现象
自感电动势
自感系数
电感

如果线圈中流过的电流发生变化，就会因磁通的变化而产生阻碍磁通变化的电动势，将其称为**自感现象**(self induction)，这时所产生的电动势 $e=-L\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 叫**自感电动势**。电动势与电流变化率的比例常数 L 叫做**自感系数**(self inductance)，也叫**电感**，单位是 H(henry，亨[利])。换言之，1H 是“当电流以每秒 1A 变化时，产生 1V 电感”，它是由线圈的形状、圈数及磁路材料决定的常数。

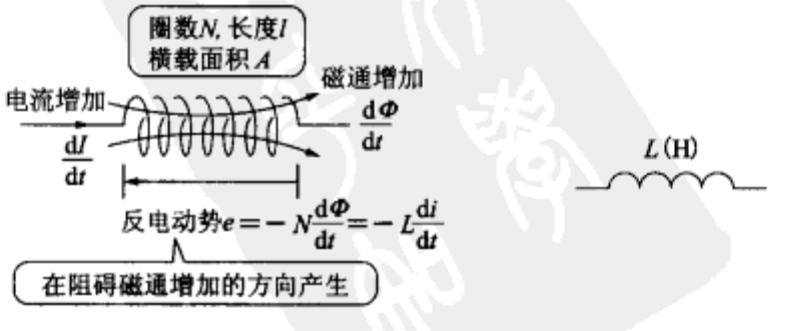
图 2.47 所示为有一定长度的螺线管，如果线圈的圈数为 N，线圈的横截面积为 $A(\mathrm{m}^2)$，线圈的长度为 $l(\mathrm{m})$，则有

$$L=\frac{\lambda\mu AN^2}{l}\ (\mathrm{H})$$

式中，λ 为系数($0.3\leqslant\lambda\leqslant1$)。

由上式可知，L 与圈数的平方及横截面积成正比。

电感常用于抑制电流的急剧变化、调整频率、能量的积蓄和转换等场合。



(a) 自感现象　　(b) 电感的图形符号

图 2.47　自感现象与电感的图形符号

电　容

静电容量　电容

在两片相向的金属板之间施加电压，由于静电感应，会在正极一侧的金属板上聚集正电荷、在负极一侧的金属板上聚集负电荷(电荷存储效应)。此时在金属板上所存储电荷量的能力称为**静电容量**(或简称**电容**)，单位是F(farad，法[拉])，称这种元件为电容(capasitor)。电容量与电容的物理结构及材质有关。如图2.48所示，电容量与金属板面积和电导率成正比，可由下式求出：

$$C=\frac{\varepsilon A}{d}\ (\mathrm{F})$$

介电常数

式中，ε为极板间所夹绝缘体的**介电常数**，是一个因介质材料不同而异的常量，单位为F/m。真空中的介电常数为$\varepsilon=8.85\times10^{-12}$F/m。当减小极板间的距离，增加极板间所夹绝缘体的介电常数时，可使C值加大。在实际使用时，由于F这种单位太大，常采用其辅助单位μF(微法，10^{-6})或pF(皮法，10^{-12})表示。

存储的电荷量

外加电压V与电荷量Q及静电容量C之间的关系可由式$Q=C/V$表示。因此也可以认为电容量C是在每1V电压的作用下，电容器所能**存储的电荷量**。

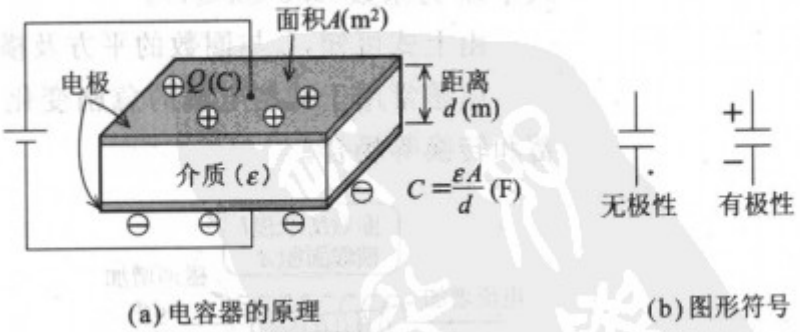


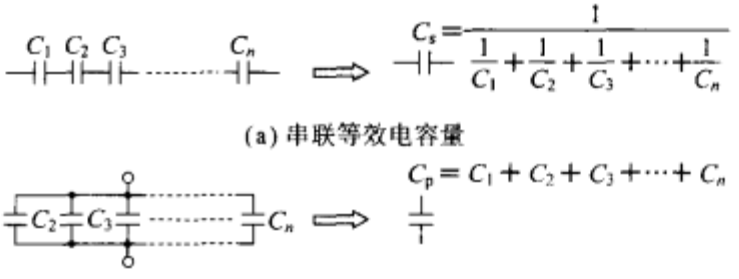
图2.48　电容器的工作原理

电容的串联与并联

等效电容量

当两个以上电容相串联时，其**等效电容量**为“各电容倒数之和的倒数”，见图2.49(a)。串联时的等效电容量要比所要串联的电容量小。两个电容串联的等效电容量为两电容量之积除以两电容量之和；n个相同电容串联的等效电容量为1个电容量的$1/n$。

当两个以上电容并联时，其等效电容量为“各电容的算术和”，可按图 2.49(b)求出。该算式与电阻串联的算式相同。



(a) 串联等效电容量

(b) 并联等效电容量

图 2.49 电容的串、并联等效电容

电容的种类、用途与形状

电容可分为固定容量电容和可变容量电容。固定容量电容有以下几种类型：

① 陶瓷型。以陶瓷为绝缘材料，价格低廉，频率特性较好。

② 塑料薄膜型。在塑料薄膜上蒸镀金属的产物。

③ 铝质电解型。价格低廉，容量大，能耐高压，品种丰富。

④ 钽质电解型。小型，频率特性和温度特性优良。

例 题

1 假设在磁通密度为 1T 的均匀磁场中放置一长度为 10cm 的导体，当该导体与磁场方向成 30°夹角、以 100m/s 的速度移动时，求在该导体上产生的电动势。

答 将 $B=1\text{T}$、$l=0.1\text{m}$、$v=100\text{m/s}$、$\theta=30°$代入电动势的公式中，可得如下结果：

$$e=B\cdot l\cdot v\cdot\sin\theta$$
$$=1\times0.1\times100\times\sin30°=5(\text{V})$$

2 假设将平板电容的面积增至 2 倍，极板的间距减至一半，那么新电容的电容量为原电容的多少倍？

答 因电容的电容量与极板的面积成正比，与极板间的间距成反比，故面积增至 2 倍、间距减至一半时，新电容的电容量为原电容的 4 倍。

题外话

电容量和电感的表示方法

电容量用与电阻相同的3位数字和1个英文字母表示。前两位为有效数字，第三位表示有效数字后0的个数，单位为pF。最后的英文字母表示容差量，F(±1%)，G(±2%)，J(±5%)，K(±10%)M(±20%)，Z(−20，+80%)。

电感用与电容量相同的3位数字或色码表示。前两位为有效数字，第三位表示有效数字后0的个数，单位为mH。

12　交流电路基础

要　点

掌握有关交流的基本知识对处理电子电路起重要作用。线圈中的电感 L 和电容 C 在交流电路中的性质与直流电路相比有较大变化，并且要经常利用这些特性。

解　释

交流、周期、频率和角速度

正弦波交流

送入家庭使用的交流电是振幅约为 141V 的周期性**正弦波交流**，如图 2.50 所示。正、负一个循环所需要的时间 T 叫周期(period)。每秒循环的次数为频率(frequency)，用符号 f 表示，单位为 Hz(hertz，赫[兹])。因此，频率与周期有 $T=1/f$(Hz)的关系。

瞬时值
最大值　振幅
峰-峰值

交流电的大小是随时间而不断变化的，它在任意时刻的大小叫**瞬时值**(instantaneous value)，其中最大的叫**最大值**(maximum value)或**振幅**(ampritude)，峰顶到峰谷的值叫**峰-峰值**(peak to valley value)，用 V_{pp} 表示。

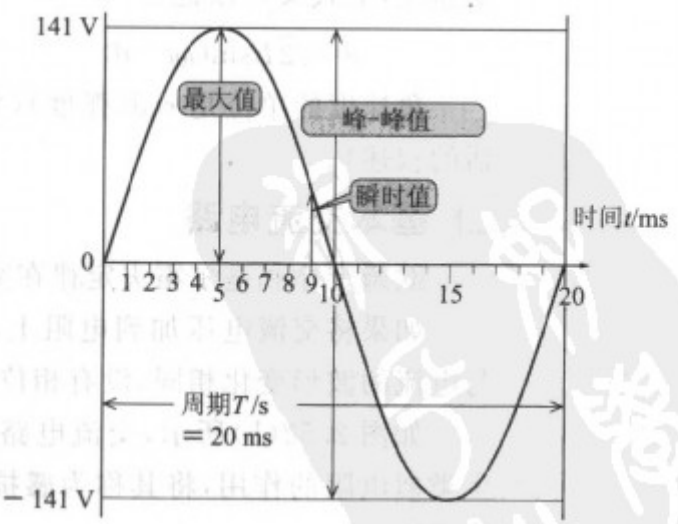


图 2.50　正弦波交流

有效值

通常交流电的大小用**有效值**(RMS：Root-Mean-Spuare value)表示，而不用最大值表示。如图 2.51 所示，将相同的负载分别接到直流电路和交流电路中，如果在相同的时间内，负载 R 所消耗的能量也相同，那么就将这时的直流电压

和直流电流称为交流电压和交流电流的有效值。

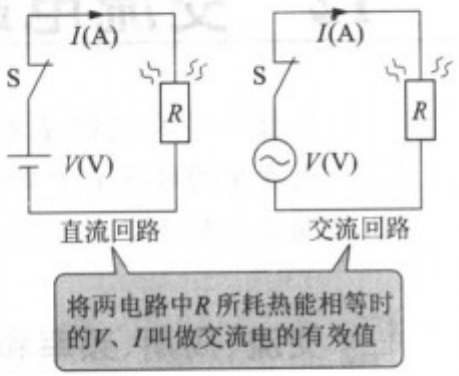


图 2.51　有效值

正弦交流电的有效值为最大值的 $1/\sqrt{2}$，换言之，100V 的直流与最大值为 141V 的正弦波交流做同样的功。

正弦交流的瞬时值 e 与有效值 E 和频率 f 的关系可以表示如下：

$$e=\sqrt{2}E\sin(2\pi f+\theta)$$

相位

角速度

式中，θ 为**相位**，表示电压的变化相对于基准的超前或滞后。$2\pi f$ 为每秒前进的角度，称为**角速度**。如果用 ω 表示角速度，上式又可以记为

$$e=\sqrt{2}E\sin(\omega t+\theta)$$

角速度的单位是 rad(弧度)(关于 rad 请参照后面篇外话的叙述)。

基本交流电路

欧姆定律和基尔霍夫定律在交流电路中也成立。

如果将交流电压加到电阻上，则电流为 $i=v/R$。电压与电流的波形变化相同，没有相位差，见图 2.52(a)。

如图 2.52(b)所示，交流电路中的电感，因自感应会产生类似电阻的作用，将其称为**感抗**。感抗的大小 X_L 与频率成正比。

感抗

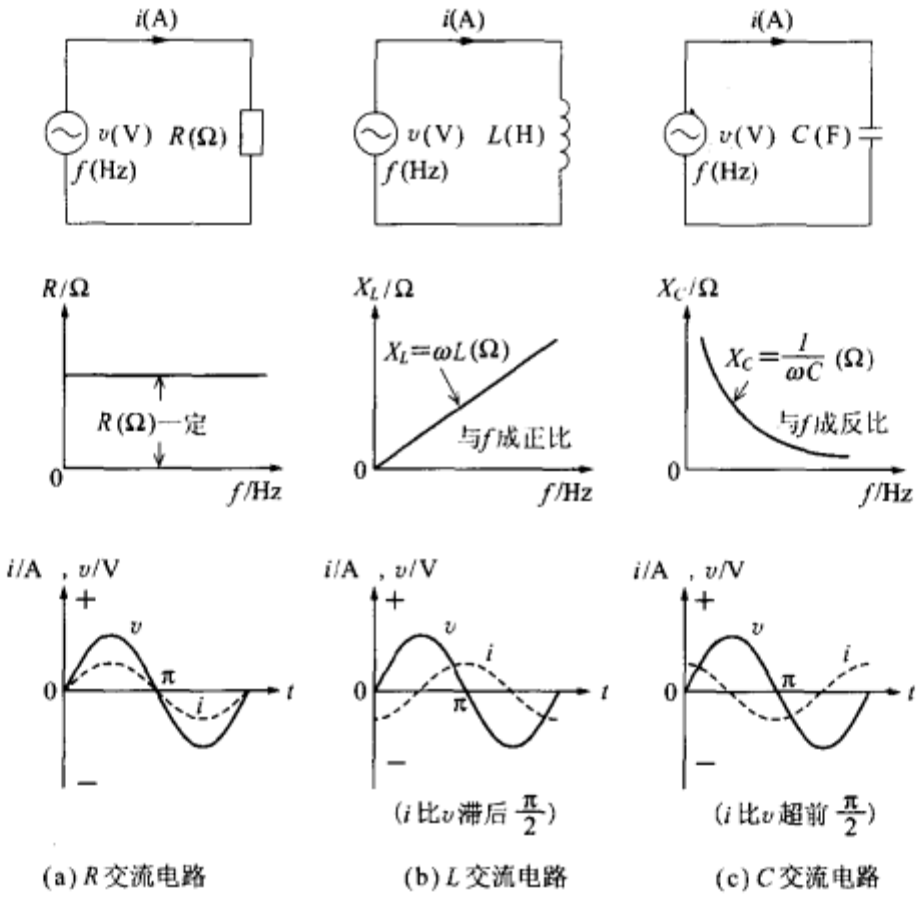
$$X_L=2\pi fL=\omega L(\Omega)$$

在这种交流电路中的电流要比所加的电压滞后 90°($\pi/2$ rad)。由于 X_L 与频率成正比，所以，只有 L 的交流电路具有容易使低频率或变化较小的电流通过的特点。

容抗

电容 C 在交流电路中也会起到电阻的作用，用**容抗** X_C

表示。X_C与频率成反比，见图 2.52(c)。



(a) R 交流电路　　(b) L 交流电路　　(c) C 交流电路

图 2.52　R、L、C 交流电路

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{\omega C}(\Omega)$$

在 C 交流电路中的电流比所加的电压超前 90°(π/2rad)。由于 X_C与频率成反比，所以，C 交流电路具有容易使高频率或急剧变化的电流通过的特点。

电阻 R、电感 L 和电容 C 串联在交流电路中，共同对电流起到电阻的作用叫**阻抗**，用 Z 表示：

阻抗

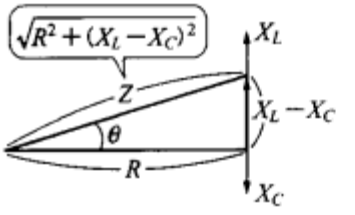
$$Z=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}\quad(\Omega)$$

由上式可以得到以下的结果：

① 感抗 X_L与容抗 X_C相互抵消，所以，阻抗 X 为两者之差。

② Z、R 和 $X(=X_L-X_C)$构成直角三角形，三者之间的关系符合勾股定理，如图 2.53 所示。底边的电阻 R 与阻抗

Z 的夹角 θ 为电压与电流的相位差。



2.53　R、X_L、X_C 和 Z 构成的直角三角形

③ 如果 X_L 与 X_C 相等，那么该电路就与只有电阻 R 的电路相同。这时的频率可由公式 $\omega L=1/(\omega C)$ 导出。

$$f_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$$

共振频率

f_0 叫**共振频率**(resonance frequency)，这时的阻抗最小，电流最大。如果减小 R，就会使加在 L 和 C 两端的电压增大几十倍。实际中利用这一性质可以选择特定的频率，所以这种电路的应用较广。

例　题

[1] 假设插座中的交流电为 100V，求该交流电的频率 f、周期 T 和最大值。

答　$f=50\text{Hz}$，$T=20\text{ms}$，最大值为 141V。

[2] 电路如图 2.54 所示，在电压 $V=100\text{V}$，$f=50\text{Hz}$ 的电源上连接一电感 $L=1000\text{mH}$，求感抗 X_L 和电流 I。

答　$X_L=\omega L=2\pi\times50\times1=314(\Omega)$

$I=V/X_L=100/314=0.318(\text{A})$

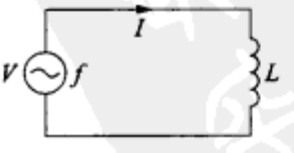


图 2.54　电　路

[3] 在 $R=10\Omega$，$L=25\text{mH}$，$C=0.1\mu\text{F}$ 的串联电路中施加交流电压 10V。

① 求共振频率 f_0。

② 求 f_0 时的 X_L 和 X_C。

③ 求共振时的电流，L 和 C 的端电压，并计算是电源电压的几倍？

答　① 共振频率 $f_0=3.183\text{kHz}$

② $X_L=500\Omega$，$X_C=500\Omega$

③ $I=V/R=1\text{A}$

所以，$V_L=V_C=I\times X_L=500\text{V}$，500/10=50(倍)

篇外话

弧 度

如图 2.55 所示，在圆弧上截取与半径同等长度的圆弧，以该圆弧所对应的圆心角为角度单位的方法，称为弧度法。单位为 rad(弧度)。

半径为 r 的圆周长度为 $2\pi r$，将圆周用半径 r 分割，$2\pi r/r=2\pi$。所以，$2\pi(\text{rad})=360°$，1rad 约为 57.3°。

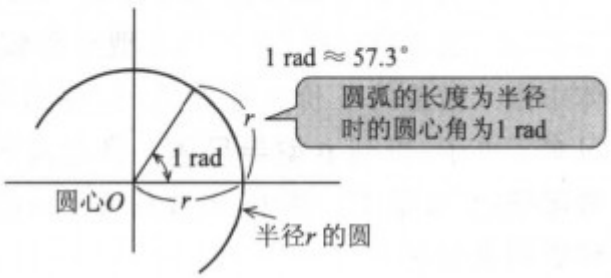


图 2.55 弧 度

13　电路器件的工作原理

要　点

在硅晶体中加入不纯物质得到的n型半导体或p型半导体，是构成晶体管和集成电路等所有半导体器件的基础。

解　释

半导体

导电性能介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体(semiconductor)。高纯度(99.999999999%，通常说"11个9")精制的硅半导体称为**本征半导体**，其电子与空穴的数目相同。在本征半导体中掺入微量的5价其他物质(如砷元素等)后，电子数目增加，得到**n型半导体**；如果向本征半导体中掺入微量的3价其他物质(如硼元素等)，则空穴的数目多于电子，得到**p型半导体**。将电流的搬运者称为**多数载流子**，在n型半导体中，多数载流子是电子，而在p型半导体中则是空穴。

本征半导体

n型半导体

p型半导体

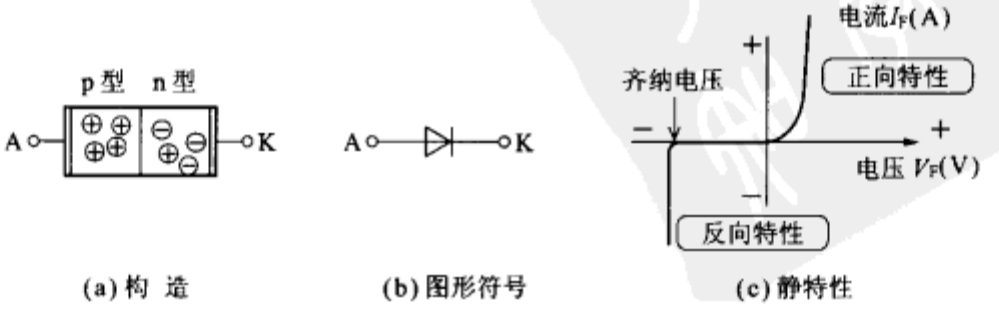
多数载流子

二极管

将p型半导体与n型半导体按点或面的方式相接，在pn接触处接上电极。当有电流流过时，电流只能从p侧的电极(**阳极**)向n侧的电极(**阴极**)单向流动。这一现象称为二极管的整流作用。

阳极　阴极

图2.56(a)所示为二极管的构造。图2.56(b)是它的图形符号，图中箭头的方向是单向导电性的方向。图2.56(c)所示为向二极管外加正向电压和反向电压时的静特性。从图中可知，对于硅二极管，外加正向电压后，从0.6V开始有



(a)构　造　　(b)图形符号　　(c)静特性

图2.56　二极管

电流流过；外加反向电压后，在电压增至很大时会产生反向电流急剧增大的现象，这一现象称为**屈服（齐纳）现象**。这时，即使电流变化很大，电压也几乎不变，人们利用这一特性制成的**恒压（齐纳）二极管**应用较多。

屈服（齐纳）现象

恒压（齐纳）二极管

晶体管（双极晶体管）

如图 2.57 所示，晶体管是由 p 型半导体和 n 型半导体组成的三层结构，有 3 个电极，分别为**发射极**（E）、**集电极**（C）、**基极**（B）。根据其构造可分为 npn 型及 pnp 型两种。图 2.57(b)所示为图形符号，发射极上有箭头。对于大多数小电流晶体管器件，从正面看引脚由左至右为 E、C、B 排列。

发射极　集电极　基极

在晶体管各引脚上流过的电流分别为 I_B、I_C 和 I_E，通常，$I_E = I_C + I_B$ 成立，发射极上的箭头表示电流方向，如图 2.57(c)所示。I_C 与 I_B 的比值 h_{FE} 称为直流电流增益。小电流晶体管的 h_{FE} 值通常大于 100，这就意味着只要改变较小的电流 I_B 就可控制是它 h_{FE} 倍的电流 I_C。即使相同的晶体管在制造时 h_{FE} 也会有偏差，通常用符号或颜色划分等级。

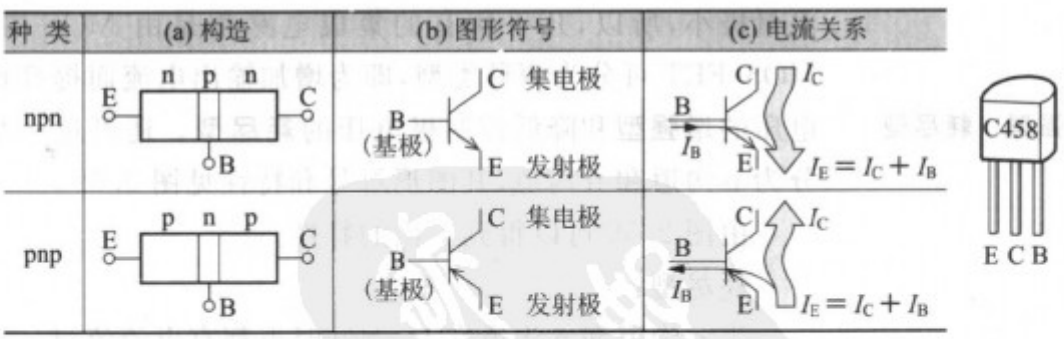


图 2.57　晶体管

场效应晶体管

场效应晶体管（FET：Field Effect Transistor）的电流载体（载流子）对 p 型的和 n 型的都在一侧，所以也叫**单极晶体管**。按构造可分为 **J-FET**（Junction FET，结型）和 **MOS-FET**（Metal Oxide Semiconductor FET）两种，如图 2.58 所示。基本型有三个引脚，控制引脚 G（gate，**栅极**）、通用引脚 S（source，**源极**）和输出引脚 D（drain，**漏极**）。通常，基板的端子与源极在内部相连。

单极晶体管

J-FET

MOS-FET

栅极

源极　漏极

因为FET是通过在绝缘的栅极G外加电压来控制输出电流的，所以要有高的输入电阻，而不需要电流。这是它与双极晶体管的根本区别。由于FET的绝缘电阻的阻值非常高，且静电较小，所以需要在制造过程中安装保护电路，同时注意操作安全。

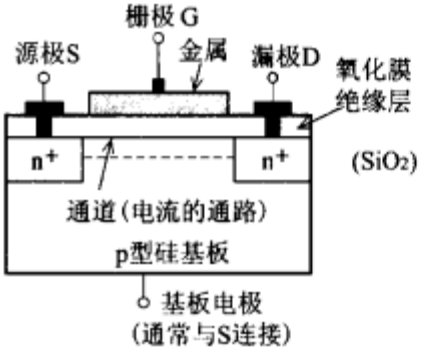


图2.58　MOS-FET的构造(n沟道MOS)

MOS -FET

这种晶体管是由金属电极、绝缘氧化膜和半导体构成，名称也是由此得来的。其特点是构造简单，容易集成化，耗电量极小，所以，几乎所有的集成电路都是由MOS构成。MOS-FET可分为两种类型，即为增加输出电流而提高栅极电压的**增强型**和降低控制极电压的**耗尽型**。还可进一步细分为p沟道和n沟道，其图形符号和特性见图2.59。

增强型　耗尽型

由图2.59可以得到下面的特性。

耗尽型：

① p沟道和n沟道在$V_{GS}=0$时也都有电流流过。

② n沟道在V_{GS}负增加时电流I_D减小。

③ p沟道在V_{GS}正增加时电流I_D减小。

④ 将$I_D=0$时的V_{GS}叫做夹断电压。

增强型：

① 在$V_{GS}=0$时断开，没有电流I_D流过。

② n沟道在V_{GS}正增加时电流I_D加大。

③ p沟道在V_{GS}负增加时电流I_D加大。

④ 将电流I_D开始流动时的V_{GS}叫做开启电压。

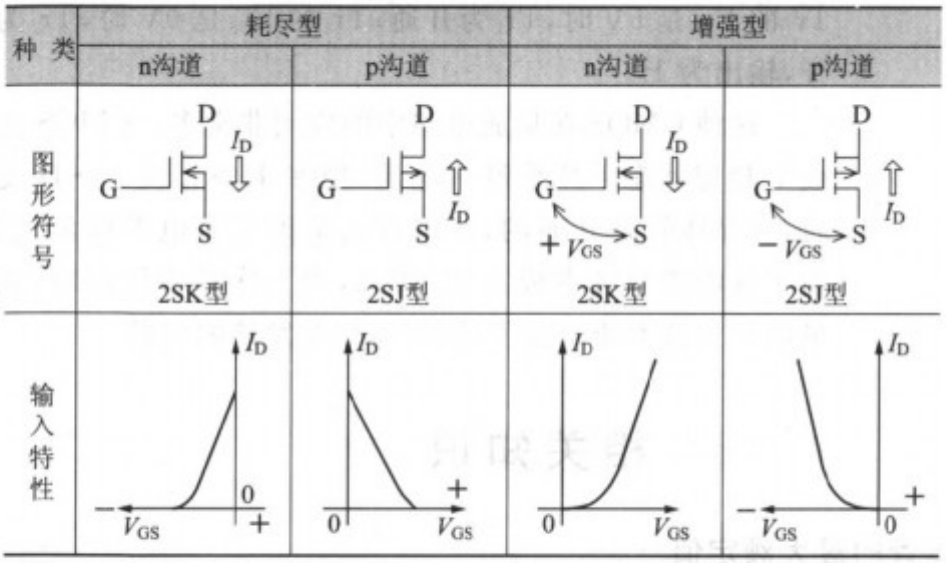


图 2.59 MOS-FET 的图形符号和特性

n 沟道 MOS-FET，在控制极电压 $V_{GS}=0$ 时，$I_D=0$；当 V_{GS} 达到 3V(大功率 MOS 为 7V)时就有足够的电流，可以起到开关的作用。MOS-FET 从小功率到大功率，可以作为多品种的开关元件使用，也有将多个 MOS-FET 封装到一起的专用驱动 IC。

CMOS

CMOS(Complementary MOS)是由 p 沟道 MOS 和 n 沟道 MOS 晶体管互补组合构成的，在稳定状态(H 或 L 状态)下几乎没有电流。用于逻辑 IC 和 CPU 时，耗电量极小。图 2.60是其反相的例子。

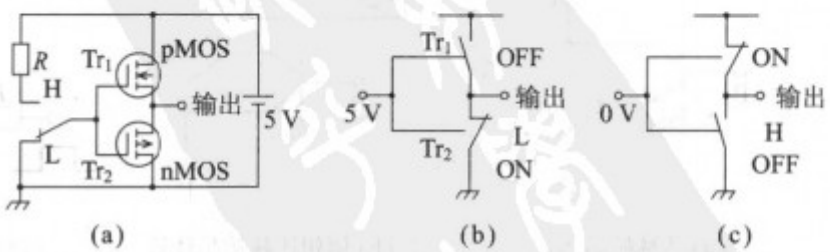


图 2.60 CMOS 反相

图 2.60(a)的开关在 H 侧，栅极的电压 $V_G=5$V。在图 2.60(b)中，Tr_1 的 V_{GS} 是 0V 时，Tr_1 为断开；Tr_2 的 V_{GS} 是 5V 时，Tr_2 为开通，输出为 L。

在图 2.60(c)中，开关在 L 侧，栅极的电压 $V_G=0$V。

Tr_1 的 V_{GS} 是 5V 时，Tr_1 为开通；Tr_2 的 V_{GS} 是 0V 时，Tr_2 为断开，输出为 H。

这种 CMOS 在集成电路中的应用非常多。CMOS 在 H 或 L 稳定状态下几乎没有电流，但在 H→L 或 L→H 变化时，两晶体管是开通的，所以在阈值附近有电源电流流过。由于该电流与频率成正比，所以，当工作频率较高时，耗电量的增大就不能忽视了，同时还伴有发热的问题。

相关知识

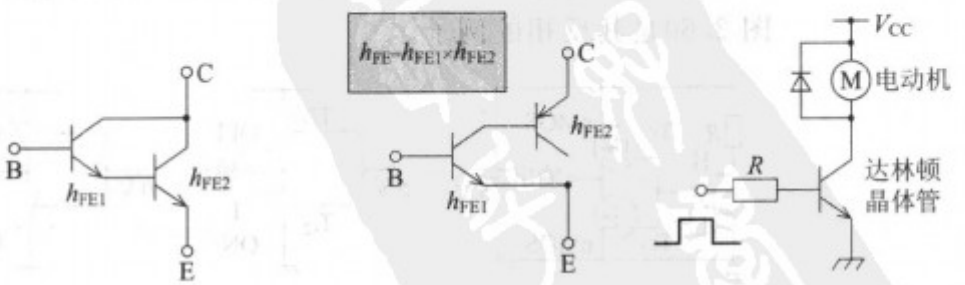
◆ 晶体管的最大额定值

使用晶体管时必须注意其最大额定值。所谓最大额定值是即使在一瞬间也不能够超越的电压或电流值。使用电机和继电器等驱动器时，在线圈中瞬间产生的反电动势也能将其损坏，所以使用时要注意其耐压值。

双极晶体管在电流较大时发热也多，并可因热失控而损坏晶体管，所以在选择集电极损耗大的元件时，必须要安装散热器。

◆ 达林顿晶体管与晶体管阵列

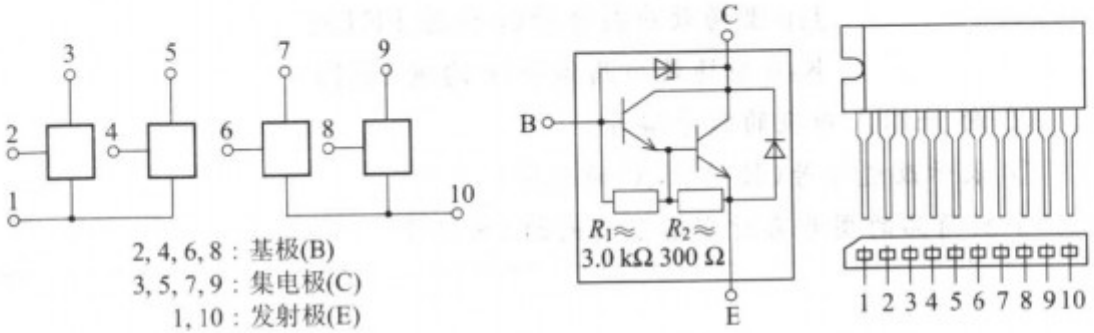
如图 2.61 所示，将两个晶体管组合封装在一起构成电流增益非常大的晶体管称为达林顿晶体管。用于电力电子的达林顿晶体管的 h_{FE} 可达 2 000 左右，用于小信号放大的也可达到 10 000 以上，故这种晶体管可以控制大电流。将不同种类晶体管的组合叫做反相达林顿晶体管。



(a) 达林顿晶体管　　(b) 倒相达林顿晶体管　　(c) 应用例

图 2.61　达林顿晶体管与电机的驱动

将特大功率的达林顿晶体管叫做大功率达林顿晶体管，使用它能够很容易地用较小的电流实现对大电流的控制。还可以将多个晶体管组合封装在一起构成集成大功率晶体管阵列，用于电机或继电器等的驱动器，见图 2.62。

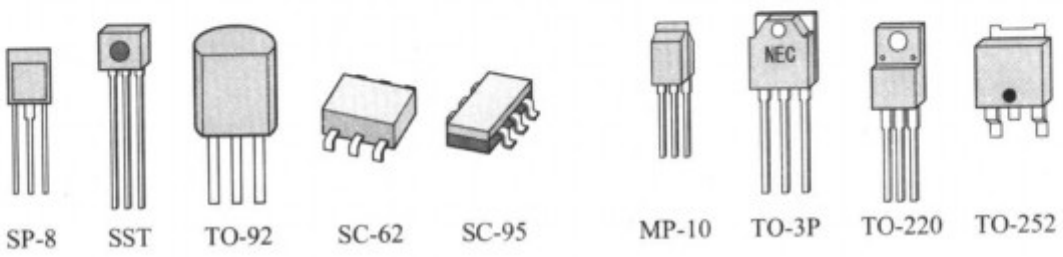


(a) 端子连接　　(b) 内部连接　　(c) 端子图

图 2.62　集成大功率达林顿晶体管阵列(NEC 制的 μPA1458H)

◆ 晶体管的封装

晶体管的外形如图 2.63 所示。



(a) 小功率达林顿管　　(b) 大功率达林顿管

图 2.63　晶体管的外形

篇 外 话

晶体管的型号

晶体管的型号是日本电子信息技术产业协会(JEITA)根据一定规则命名的，也有生产厂商自己命名的(现在互联网上能够很容易地检索到商品的数据)。

晶体管的命名方法：2S①②③，如 2SC1815A。

① 用途类别　A：pnp 型高频晶体管；
　　B：pnp 型低频晶体管；
　　C：npn 型高频晶体管；
　　D：npn 型低频晶体管；

J：p 型场效应晶体管(p 沟道 FET)；

K：n 型场效应晶体管(n 沟道 FET)。

② 向 JEITA 申报的顺序编号。

③ 表示改进序号(按 A、B、C 的顺序)。

个别商品的型号有时省略了前面的 2S 符号。

14 逻辑电路的组成

要 点

控制技术在很大程度上是通过以计算机为核心的数字技术完成的。数字电路采用二进制数或二进制码表示信息，即用电压的高、低或者电流的有、无来表示逻辑“0”和“1”，通过逻辑电路实现一些复杂的处理。逻辑电路除最基本的 AND 电路、OR 电路和 NOT 电路等以外，还要有记忆元件触发器才能够组成计数器或运算电路等。

解 释

二进制数与十六进制数

通常使用的是十进制数，十进制数 365 可以表示成

$$365 = 3\times100+6\times10+5\times1$$
$$= 3\times10^2+6\times10^1+5\times10^0$$

上式中的 10 称为基数，10 的幂称为该位的权。

仅用 1 和 0 两种数字表示的数称为二进制数。

二进制数的基数为 2。例如，二进制数 101110 可以表示成

$$101110 = 1\times2^5+0\times2^4+1\times2^3+1\times2^2+1\times2^1+0\times2^0$$
$$= 32+0+8+4+2+0=46$$

二进制数各位的权是从第 1 位开始，按 1、2、4、8、…的方式增加，见表 2.7。表 2.8 中给出了包含小数点以下的二进制数各位的权。根据上面的结果可知，二进制数 101110 若用十进制数表示是 46。这里将二进制数中的一个位称为 **1 位**(bit)，8 个位构成一个**字节**，16 个位为一个**字**。

1 位　字节　字

十六进制数

十六进制数的每位要用 16 种数码表示。由于没有 16 种独立的数码，因此，通常采取 0～9 沿用阿拉伯数字、10～15 采用英文字母 A～F 来对应表示。由于十六进制的基数为 16，因此，各位的权是 16 的幂。

例如，十六进制数 3BD 可以表示为

$$3BD = 3\times16^2+B\times16^1+D\times16^0$$
$$= 3\times256+11\times16+13\times1$$
$$= 768+176+13=957$$

由结果可知，它用十进制数表示是957。由表2.7还可以看出，采用十六进制描述一个数据的位数很少，而1位十六进制数正好对应4位二进制数，因此，当需要用多位二进制数或二进制码描述数据时，如果采用十六进制替代能简化描述。

表2.7　数的表示方法

十进制数	二进制数	十六进制数
0	0	0
1	1	1
2	10	2
3	11	3
4	100	4
5	101	5
6	110	6
7	111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F
16	10000	10
17	10001	11

表2.8　二进制数的位与权

位		权	
		指数表示	十进制数表示
整数部分	⋮	⋮	⋮
	6位	2^5	32
	5位	2^4	16
	4位	2^3	8
	3位	2^2	4
	2位	2^1	2
	1位	2^0	1
	小数点	.	.
小数部分	1位	2^{-1}	0.5
	2位	2^{-2}	0.25
	3位	2^{-3}	0.125
	4位	2^{-4}	0.062 5
	5位	2^{-5}	0.031 25
	⋮	⋮	⋮

为了区分二进制数、十进制数和十六进制数，可以使用如下的标记。

二进制数：$(1101)_2$，$(1101100)_B$，$101011_{(2)}$，$101011_{(B)}$

十进制数：$(486)_{10}$，$(7536)_D$，$1953_{(10)}$，$2000_{(D)}$

十六进制数：$(1AB)_{16}$，$(7BC)_H$，$FFF_{(16)}$，$ABCD_{(H)}$

基本逻辑电路

在基本逻辑电路中，除AND、OR、NOT电路之外，还有NAND、NOR、EX-OR(Exclusive OR)等多种逻辑电路。

逻辑“与”电路

AND电路　AND电路称为**逻辑“与”电路**，也称与门。当所有输入都为1时，输出才为1。图2.64(a)给出一个输入为A、B，输出为Y的双输入AND电路的逻辑符号。由于这种符号源于美军标准(**MIL标准**)，因此称为**MIL符号**，也是在很多领域普遍使用的逻辑电路符号。

MIL标准

MIL符号

逻辑“或”电路

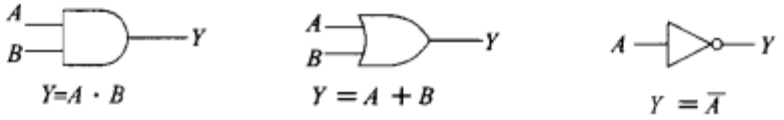
OR电路　OR电路称为**逻辑“或”电路**，也称或门。只

要输入中有一个为1，输出就为1。图2.64(b)给出一个双输入OR电路的MIL符号。

逻辑"非"电路
反相器

NOT电路 NOT电路称为**逻辑"非"电路**或**反相器**，也称非门，作用是将输入反相后输出。图2.64(c)给出了NOT电路的逻辑符号，用三角形和小圆圈表示。小圆圈称为**反相状态描述符**，在MIL中表示低(Low)使能状态。

反相状态描述符



(a) AND电路　(b) OR电路　(c) NOT电路

图2.64 基本逻辑电路(1)

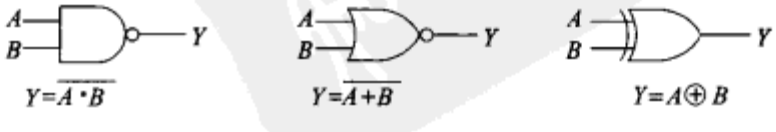
在实际电路中，除AND、OR、NOT外，还常使用由这三种电路组合而成的NAND电路及NOR电路。仅用NAND电路或NOR电路中的任何一种电路，就可以构造出AND、OR、NOT的等效电路。然而从防止噪声干扰的角度考虑，实际电路应采用低使能的电路。

NAND电路 NAND电路是在AND电路的输出端加上一个NOT电路构成的。其工作原理是："只有当输入全部为1时，输出才为0"。MIL符号是在AND的输出端加一个小圆圈，如图2.65(a)所示。

NOR电路 NOR电路是在OR电路输出端加一个NOT电路构成的。其工作原理是："只要输入中有一个为1，输出就为0。"MIL符号是在OR的输出端加一个小圆圈，如图2.65(b)所示。

EX-OR电路 EX-OR电路是："当两个输入不同(不一致)时，输出为1。"其图形符号和逻辑表达式如图2.65(c)所示。称为**逻辑"异"电路**或**不一致电路**，也叫异门，在加法运算电路和奇偶校验电路中应用较多。

逻辑"异"电路
不一致电路



(a)NAND电路　(b)NOR电路　(c)EX-OR电路

图2.65 基本逻辑电路(2)

真值表与时间图

真值表
时间图

有时仅通过逻辑电路图很难看出输入与输出间的逻辑关系。这时，就需将所有可能的输入状态(0或1)与对应的输出状态列成一个表，通过此表，输入和输出的关系就可一目了然，此表称为**真值表**(truth table)，见图2.66。将时间的输入与输出关系用波形来表示的是**时间图**，由于时间图便于从视觉的角度理解输入与输出的关系，在实际中也常使用。

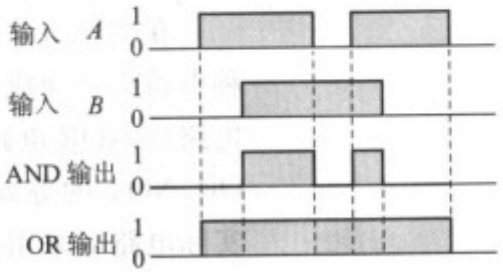
电路的实际操作顺序：①制作真值表；②由真值表得到逻辑表达式；③简化表达式；④设计逻辑电路。

输入		输出	
A	B	AND回路	OR
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	1

(a) 2输入AND电路和2输入OR电路

输入A	输出Y
0	1
1	0

(b) NOT



(c) AND和OR的时间图

图2.66　基本逻辑电路的真值表和时间图

逻辑表达式

逻辑表达式

逻辑表达式是将逻辑电路的输入与输出关系用表达式形式来表示。基本运算电路中的双输入AND电路、双输入OR电路及NOT电路可用以下的表达式来表示。

AND电路的逻辑表达式：$Y=A\cdot B$(读成A与B)

OR电路的逻辑表达式：$Y=A+B$(读成A或B)

NOT电路的逻辑表达式：$Y=\overline{A}$(读成A的非)

逻辑代数
布尔代数　公理
定理

用代数式的形式表达逻辑运算的数学分支，称为**逻辑代数**或**布尔代数**。逻辑代数的运算，可以根据**公理**以及由公理推导出的**定理**来进行，在下面列出的公理及定理中，(a)与(b)是相互对应的。

公理

公理1　(a)　若$A\neq 0$，则$A=1$　(b)　若$A\neq 1$，则$A=0$

公理2　(a)　$0\cdot 0=0$　(b)　$1+1=1$

公理 3 (a) $1 \cdot 1=1$ (b) $0+0=0$

公理 4 (a) $0 \cdot 1=1 \cdot 0=0$ (b) $1+0=0+1=1$

公理 5 (a) $\overline{1}=0$ (b) $\overline{0}=1$

定理

定理 1 (a) $A \cdot B=B \cdot A$

(b) $A+B=B+A$ 交换律

定理 2 (a) $(AB)C=A(BC)$

(b) $(A+B)+C=A+(B+C)$ 结合律

定理 3 (a) $(A+B)(A+C)=A+BC$

(b) $AB+AC=A(B+C)$ 分配律

定理 4 (a) $A \cdot 0=0$

(b) $A+1=1$

定理 5 (a) $A \cdot 1=A$

(b) $A+0=A$

定理 6 (a) $A \cdot \overline{A}=0$

(b) $A+\overline{A}=1$ 互补律

定理 7 (a) $A \cdot A=A$

(b) $A+A=A$ 重叠律

定理 8 (a) $A(A+B)=A$

(b) $A+AB=A$ 吸收律

定理 9 (a) $\overline{\overline{A}}=A$ 双重否定

定理 10 (a) $\overline{A \cdot B}=\overline{A}+\overline{B}$

(b) $\overline{(A+B)}=\overline{A} \cdot \overline{B}$ 德·摩根定理

真值表 文氏图

以上这些定理可由公理进行证明，也可用**真值表**或**文氏图**(卡诺图)得到相同的印证。

触发器

触发器

触发器(FF:Flip-Flop)是可以记忆 1 个位的信息元件。具有“记忆”功能，可以构成计数器和运算电路等顺序电路，是计算机等数字电路中不可欠缺的元件。

FF 按功能可分为 RS-FF、D-FF、JK-FF 和 T-FF 等，如图 2.67 所示，除 RS-FF 以外的 FF 都是按脉冲动作的同步型。输出 Q 和 $\overline{Q}$ 为相互反转的关系。

RS-FF 具有 R、S 两个输入和 Q 和 $\overline{Q}$ 输出。动作为：“如

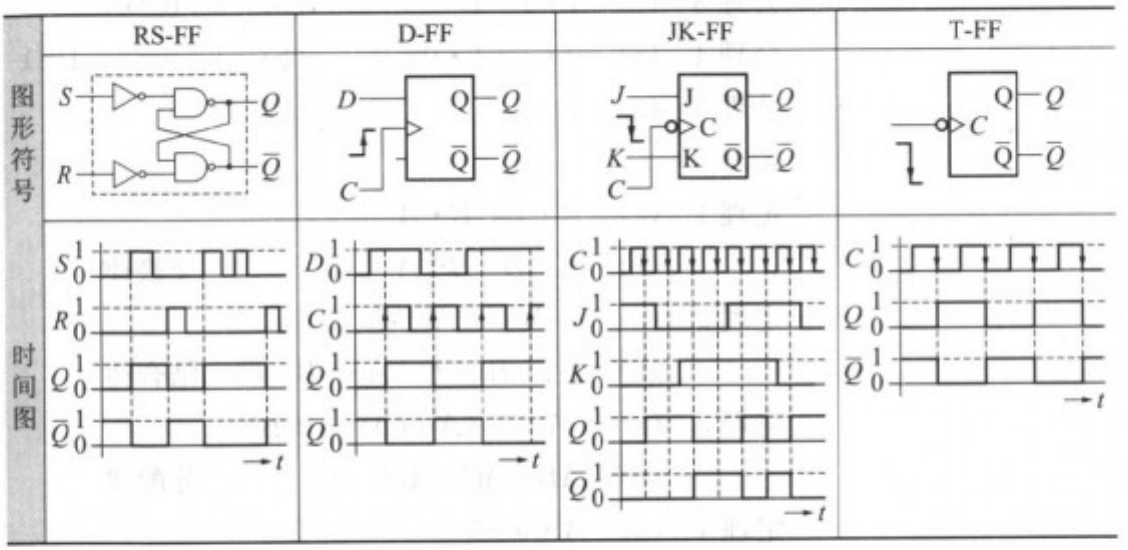


图 2.67　触发器的图形符号和动作

果只有 S 为 1 的一个输入，则输出 $Q=1$，$\overline{Q}=0$；如果只有 R 为 1 的一个输入，则输出 $Q=0$，$\overline{Q}=1$。”为了便于记忆，可以记作：“将输入 S 置 1，则 Q 为 1；反之，将输入 S 置 0，Q 也为 0。”S 和 R 同时为 1 时，禁止使用。虽然 $S=R=1$ 时，$Q=\overline{Q}=1$ 是稳定的，但在随后的 $S=R=0$（记忆方式）时，Q 和 $\overline{Q}$ 是 1 还是 0 却完全不能确定，还需根据电路的情况而定。

非同步工作时，有输入就会被直接输出，所以常在开关的无振动电路中使用。

D-FF 也叫延迟（delayed）型 FF，动作比较简单。但在附加了外部电路时也能够作为其他类型的 FF。同步时可按时钟的前沿或后沿（边界）动作。

动作很简单，只需“在时钟将要到来时，输入 D 在输出 Q 端输出”即可。

在 FF 的输入端要加上楔形符号“>”。在楔形符号上再加小圆圈时，表示这种 FF 输出 Q 是在时钟 0→1（后沿）变化的瞬间读入；不加小圆圈表示在时钟 0→1（前沿）变化的瞬间读入。

JK-FF 是多功能的 FF，很容易转变为其他类型的 FF。在时钟将要到来时，如果 $J=1$，$K=0$，将 Q 置 1；反之，$J=0$，$K=1$，将 Q 置 0。为了便于记忆，可以记作：“J 为置 1

的输入，K 为置 0 的输入。"其特点为 J 和 K 同时为 1 时，Q 和 $\overline{Q}$ 翻转。

T-FF 只有时钟输入端的输入和简单的动作："每当有时钟输入时，输出翻转"，常用于将高频变为低频的分频电路和二进制计数器等。

寄存器与计数器

寄存器

寄存器是将数据暂时记忆的小规模存储器。用 4 个 D-FF就可以构成 4 位存储器，如图 2.68 所示。首先在 4 个 D 的输入端加上数据，当发出时钟脉冲后数据就会在存储器中记忆，然后记忆的数据在 Q 端输出。如果在串行寄存器的 D_{IN} 输入端加上时钟和同步的 1011，那么就按 Q1→Q2→Q3→Q4 的顺序记忆，共记忆 4 个数 1011。寄存器有并行寄存器、串行寄存器，以及两种功能同时具备的多功能寄存器。

计数器

使用 FF 的还有**计数器**。一个 FF 能够记忆二进制数的 1 位，要记忆十进制数的 n 位数就必须使用 N 个 FF，N 满足：$n<2^N$。计数器是非同步型的，即全体 FF 不是同步动作。计数器有 2^N 进制(二进制)和 N 进制的两种。

通常，非同步型的电路简单，但容易产生噪声，不适合做高速动作。在标准逻辑 IC 中有各种方式的计数器。

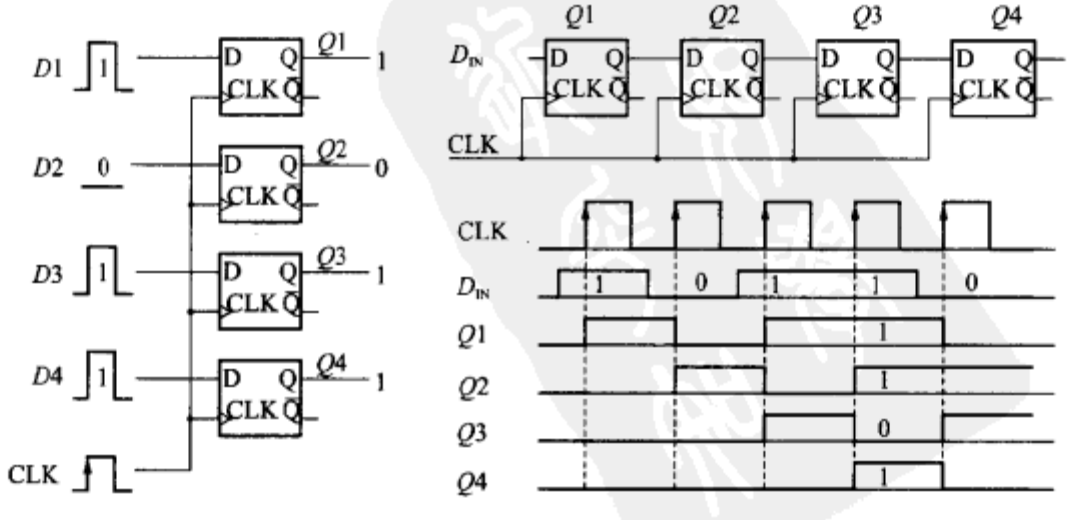


图 2.68 并行寄存器和串行寄存器

标准逻辑 IC

其种类有以下几种：

① TTL。由双极晶体管构成，速度高，且耗电量也高。电源电压的范围为5V±5%。

② 74LS系列。是高速的且能够控制耗电量的TTL。

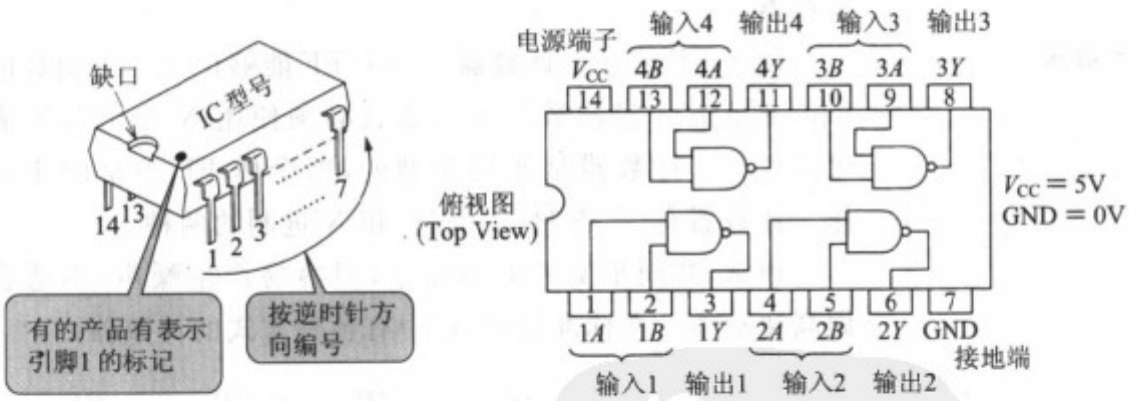
③ 74F系列。是速度更高的TTL。

④ CMOS。由MOS构成，具有耗电量低和输出振幅大等特点。电源电压的范围宽。

⑤ 74HC系列。耗电量低，动作速度高。电源电压的范围为2.5～6V。

⑥ 4000/4500系列。速度低，耗电量也非常低。电源电压的范围较宽，为3～12/18V。

IC的外形和引脚编号参见图2.69。



(a) IC的引脚编号(14个时)　　(b) 74HC00的端子连接

图2.69　IC的外形和引脚编号

阈电平

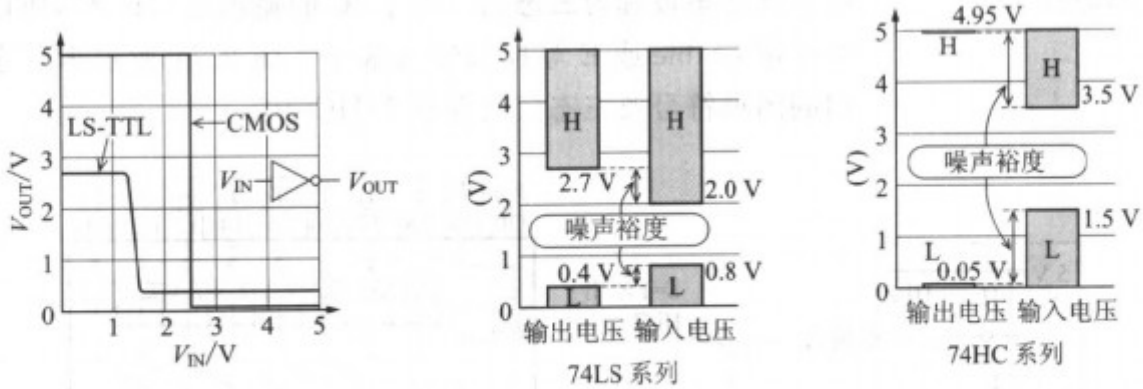
逻辑电平　图2.70是LS-TTL和CMOS转换开关的输出特性。对于CMOS，输出是反转的输入电压(**阈电平**)，正好是电源电压的1/2。对于TTL，虽然输出的振幅可达到电源电压的最大摆动，但这是理想的特性，通常难以达到。TTL的阈电平却只有1.4V，输出的振幅也较小。图2.70(b)是TTL和CMOS的输出电压，以及输入为"H"或"L"的电压范围，左图为TTL，右图为CMOS。

对于LS-TTL，要保证输出电压"H"大于2.7V，"L"小于0.4V。与之对应的输入端，"H"的电压应大于2.0V，"L"

噪声裕度

的电压应小于0.8V。所以，因某种原因使输出发生变化的余裕，“H”和“L”都只是0.4V。将这个余裕称为**噪声裕度**。CMOS的噪声裕度，“H”和“L”都接近1.5V。将TTL的输出作为CMOS的输入时，“H”的输出为2.4V。但有时可能会出现CMOS的输入端不能够判别“H”的情况。为了防止出现这种情况，必须将TTL的输出通过**负载电阻**(10kΩ)与电源连接。

负载电阻



(a) TTL和CMOS的输入/输出特性　　(b) TTL和CMOS的输入/输出电压

图2.70　转换开关的输入/输出特性和输入/输出电压

输出负载数　如果将逻辑IC的输出端与下一级的输入连接就会有电流的流入或流出，但在输入端能够连接的端子数是有限的。将这个数叫做**输出负载数**。LS-TTL和CMOS的输出电流如表2.9所示，输出为“H”时由下一级流出，为“L”时从下一级的输入端流入(**同步电流**)，表2.9中的数值为最大值。如表2.9所示，当输入端为LS-TTL时，在“H”流入，在“L”流出。CMOS的电阻非常大，故流出和流入均可忽略。

输出负载数

同步电流

表2.9　标准逻辑IC的输入和输出电流

逻辑电平	输出端子的电流(最大值)			输入端子的电流	
	LS-TTL	74HC	4000/5000	LS-TTL	CMOS
H	0.4mA→	4mA→	1mA→	→0.02mA	0
L	8 mA←	4mA←	1mA←	←0.36mA	0

注：“→”为在输出端流出(在输入端流入)；“←”为在输出端流入。

例如，用74HC驱动LS-TTL时，HC允许的电流“H”

和“L”均为 4mA。在 LS-TTL 的输入端，由于“L”为 0.36mA 的同步电流，4/0.36＝11.1，所以输入端最多能够接 11 个端子(“H”为 4/0.2＝20，虽然输入端子最多允许接 20 个，但实际连接数目还是应该少一些)。

三态门　如果将总线缓存等的输出在“H”或“L”中固定，就要影响到其他电路，所以要将输出端与内部电气隔离。将这种状态叫做**高阻状态**(Hi-Z)。“H”、“L”和“Hi-Z”这 3 种状态被称为**三态门**。由于 IC 的输出是“Hi-Z”，所以要使用 enable 或 E 等控制输入端子。图 2.71 所示为三态门的图形符号及三态门缓存器 74HC540。

高阻状态

三态门

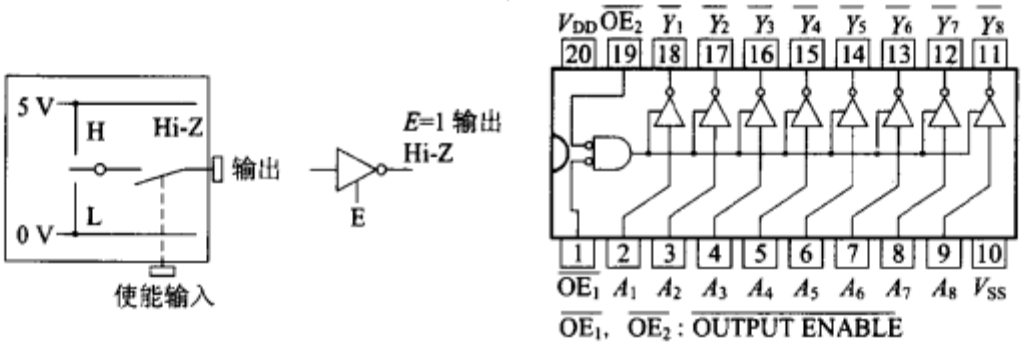


图 2.71　三态门的图形符号及三态门缓存器 74HC540

施密特反相器

磁滞特性

施密特反相器　**施密特反相器**是使反相器的输出特性具有**磁滞特性**的 NOT 电路。如图 2.72 所示，当输入增加或减少时，就会将阈电压的差值反馈，保证输入的变化不会影响到输出。利用这种特性，施密特反相器常用于输入变化较大的电路或波的整形。

图 2.73 是施密特反相器 74HC14 和施密特 NAND、74HC132 的端子连接。

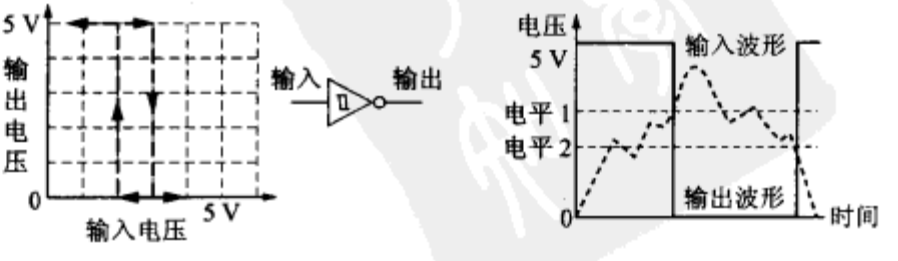


图 2.72　施密特反相器的磁滞特性

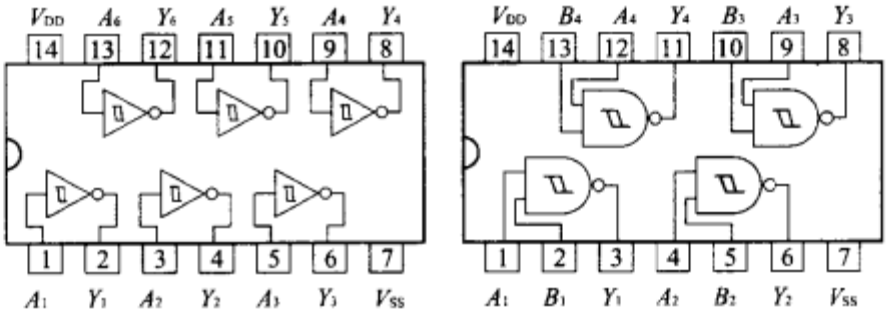


图 2.73　74HC14(左)和 74HC132(右)的端子连接

例 题

1　请将下列的十进制数分别转换为二进制数和十六进制数。

(1)24 (2)100 (3)255 (4)0.25 (5)64.34375

答　(1)$(11000)_2(18)_H$ (2)$(1100100)_2(64)_H$ (3)$(11111111)_2(FF)_H$
(4)$(0.01)_2(0.4)_H$ (5)$(1000000.01011)_2(40.58)_H$

2　化简 $Y=A\cdot B\cdot C+A\cdot \overline{B}\cdot C\cdot A\cdot B\cdot \overline{C}$。

答　$Y=A\cdot B+A\cdot C=A\cdot (B+C)$

15　集成电路

要　点

集成电路(IC)是通过微细加工技术在硅单晶基板上制作出的大量晶体管电路。典型的集成电路有微处理器、各种存储器、微型控制器和 ASIC 等。LSI(Large Scale IC)表示大规模的集成电路。

解　释

集成电路

IC 的种类

集成电路简称 IC(Integrated Circuit)，是将电阻、电容和电感等通过微细加工技术在几毫米到十几毫米的半导体基板上形成的电子电路，最后要用塑料等封装。集成电路按其构造可以分为**单片 IC** 和**混合 IC** 两种形式。单片 IC 是在一个硅基板上将晶体管集成化；混合 IC 是将多个 IC 呈平面或立体地组合。

单片 IC　混合 IC

IC 的特点

IC 之所以能够在较短的时间内以惊人的速度发展，在应用领域几乎覆盖了所有商品，其原因主要有如下几点：

① 通过照相制版技术可以大量复制。

② 通过集成化使部件数量减少，容易实现小型化。

③ 减少了配线，使可靠性得以提高。

④ 迎合了低耗电量和小型化的社会潮流。

⑤ 批量效益显著，从而产量越大成本越低。

通用 LSI

标准逻辑 IC　将在数字电路中经常使用的逻辑电路、计数器、译码器、缓存器和放大器等 IC 化，以型号已经标准化的 74 系列最有名。早期开发的是 TTL74 系列，但后来被耗电量小的 CMOS 所替代，成为主流产品。最近，PLD 正在逐渐成为逻辑 IC 的主流，PLD 的特点是用户可以通过程序简单地更改内部电路。

微处理器(MPU)　微机用的 CPU。

微型控制器(MCU)　由 8 位的 CPU 和存储器，以及输

入、输出用的周边电路等组成的控制用 LSI。典型的 MCU 有美国 Microtechno Ron 公司生产的 PIC(Programmable Interface Controller)和 Atto-Mel 公司生产的 AVR。并提供了专用开发环境。

通用存储器

DRAM　称为动态随机存取存储器,是在内存中使用的**挥发性**(不供电时内容消失)**存储器**。其结构简单,容易实现集成化。由于内容会在短时间内消失,需要不断地**重新写入(更新)**。

挥发性存储器

重新写入(更新)

SRAM　称为静态 RAM,是不用更新的挥发性存储器。其缺点是与 DRAM 相比电路较复杂,所以不利于高度集成化,但使用方便。

ROM(EPROM、EEPROM)　称为只读存储器,是基本不用写入的**不挥发存储器**。EPROM 和 EEPROM 是可以电擦除和写入的类型。

不挥发存储器

快速存储器(闪存、U 盘)　1984 年由东芝开发的划时代的存储器,是能够重新写入且不挥发存储器。由于具有更高的可操作性和大容量,所以在手机和便携式音乐播放器等中的应用会急剧增长。

特殊用途的 LSI

ASIC(Application Specific IC)　针对某种特殊用途定制的 LSI。有系统 LSI、声音合成 LSI 和液晶(LCD)放大器等。

UPIC(User Programmable IC)　使用专用工具能够二次开发的 LSI。

PLD(Programmable Logic Device)　这是通过开发专用的程序语言写入的,能够按要求实现逻辑动作的 LSI。

ASSP 是由厂家针对特殊用途单独设计的标准 LSI。有数字信号处理器、图像处理(GSP)LSI、控制 LAN 用、汽车用和通信用等。

其他的 IC

数字 IC 有 CMOS 传感器、CCD 图像传感器和半导体激光用等;模拟 IC 有运算放大器、A/D 和 D/A 转换用、电源

IC 和液晶显示器用等。

PLD

PLD(Programmable Logic Device)是用户可以通过调整程序来构成任意逻辑电路的 LSI。由于程序是写在快速存储器上的,所以可做多次更改,改变电路也很容易。PLD 可分为适用于小规模电路的 **CPLD**(Complex PLD)和适用于大规模电路的 **FPGA**(Field Programmable Gate Array)两大类。可以将多个逻辑 IC 合并成一个 PLD,以实现小型化和保密。目前的状况是 LSI 仅具有 PLD 的一些特点,处于正在向 PLD 发展的过程中。程序语言使用 **Verilog HDL** 和 **VHDL** 等专用语言,写入需通过个人计算机用的开发配套工具等进行。

CPLD

FPGA

Verilog HDL

VHDL

IC 的封装示例

如图 2.74 所示,IC 的封装可分为插入型和面安装型,外形的种类繁多。



图 2.74　IC 的外形

集成电路的耗电量

现在的集成电路是低耗电量和容易集成化的 CMOS 结构。虽然特点是具有非常低的耗电量,但其性质是耗电量与工作频率成正比地增大,这就直接影响到了高度集成化的实现。在输入接近 0V 或 5V 的正常状态下,输出部分的 n 沟道 MOS 和 p 沟道 MOS 的一侧是 ON,另一侧是 OFF,

没有电流从电源流过。但是，在输出反转时（阈电平约为 2.5V），两侧的晶体管均为 ON，短时间内有电源电流 I_D 流过，参见图 2.75。因为这一电流是在输出电平变化时流过的，所以，随着频率的提高，从电源流过的平均电流也相应增加，耗电量和发热也随之增加。

现在，因 CPU 的发热问题已限制了时钟脉冲的高速化，故转向不单纯依靠提高时钟速度来提高处理速度，而是朝着多样化方向发展。

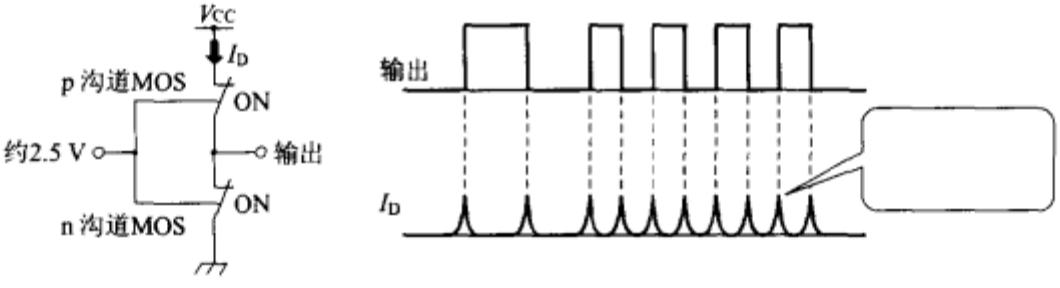


图 2.75 输出的变化和电源电流

相关知识

◆ CPU 集成度的变迁（穆尔定律）

Intel 公司的创始人之一戈登·穆尔（Gordon Moore）在 1965 年指出“在一个半导体芯片上能够集成的晶体管数大约每 18 个月或 2 年提高到 2 倍”，这个穆尔定律到现在仍然适用。今后，由于平板印刷技术和发热问题的限制，穆尔定律也许最多能够用到 2018 年，那时晶体管数将达到饱和。图 2.76 是 CPU 和存储器的集成度的变迁。在 1971 年出现的最初的微型计算机 4004 仅有 2200 个晶体管，到 2003 年已达到 4100 万个，2005 年将超过数亿。在 32 年内实际的集成度提高了 2 万倍，时钟频率也达到了 5400 倍。

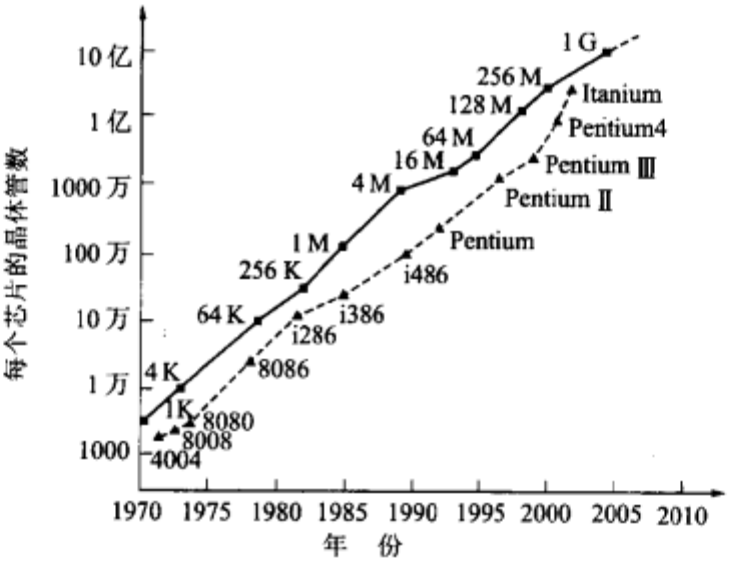


图 2.76　穆尔定律(集成度的变迁)

(引自:http//www. intel. com/research/silicon/mooreslaw. htm)

16 计算机基础

要点

计算机从通用的大型计算机到安装在IC卡等中的微型芯片，种类各异，但各种计算机的基本动作是相同的。现在，大多数计算机都是依次按存储的程序执行命令的诺依曼型。

解释

计算机的五个功能

诺依曼型计算机具有五大功能，即控制、运算、记忆（存储）、输入和输出，其分别由实现这些功能的装置构成，见图2.77。

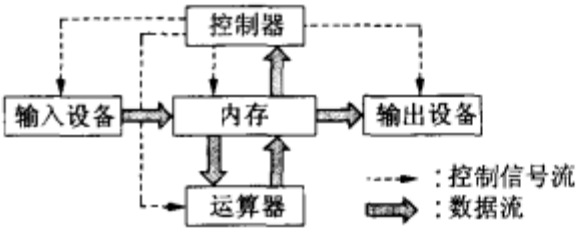


图2.77 构成计算机的五个装置

① 控制器：解读命令，向各装置发出指令，以及控制整个装置协调工作。

② 主存储器（内存）：暂时记忆程序和数据。

③ 运算器：对数据进行计算、比较和判断等处理。

④ 输入设备：输入程序和数据，送到存储器中。

⑤ 输出设备：将处理后的数据发送到记录、显示装置或控制对象。

中央处理器
主机
外部设备　内存
外存储器
地址

控制器和运算器统称为**中央处理器**（CPU：Central Processing Unit），再加上主存储器叫**主机**。主机以外的是**外部设备**（peripheral device）。**内存**是能够高速工作的存储器，用于保存大量的程序和数据，使用硬盘和DVD等的是**外存储器**。内存中的记忆场所叫**地址**，从0号连续分配地址。一个地址能够记忆的数据长度大多为1B或2B。存储器存储容量的单位“字节”用B表示，存储容量的其他单位如下。

1KB(千字节)=1024B　　1MB(兆字节)=1024KB

1GB(吉字节)=1024MB　　1TB(太拉字节)=1024GB

计算机的动作

将需要处理的顺序编制成计算机能够理解的代码，即程序存储在存储器中，然后执行每一条命令。从命令的读入到命令的执行叫**命令循环**(instruction cycle)，是由**命令读出阶段**(instruction fetch cycle)和**命令执行阶段**(instruction execute cycle)构成。

命令循环

命令读出阶段

命令执行阶段

通用计算机的命令语句长度是16位或32位。通常，存储器的1个地址存放1个命令，但小型计算机的1个地址是8位(1B)，所以，2B或3B的命令等常有多个地址。

通过计算机的输入、输出控制

在使用计算机控制时，计算机要将控制对象的状态及其周围的状态通过传感器等输入，发出与当前状态对应的控制指令。输入量有温度、湿度、流量和风速，以及控制对象的位置、角度和力等，输出量有回转力、压力、声音等许多物理信号，都是连续变化的物理量，大多都是模拟量，而计算机内部能处理的是数字信号。所以，输入时，模拟信号要转变为数字信号(**A/D转换**)；输出时，要将数字信号再转变为模拟信号(**D/A转换**)。这样，计算机需要有与外部设备相连接的部分，将其称为**接口**(interface)或**输入/输出接口**(I/O接口)。

A/D转换

D/A转换

接口

输入/输出接口

相关知识

◆ 无人化工厂

FMS(Flexible Manufacturing System)是用于生产多品种、小批量产品的一种制造系统。它将生产系统柔性化，不需要人去直接干预零件加工和搬运等机械设备，仅靠计算机控制即可实现生产过程的全部自动化。

支撑FMS制造系统的加工机械，是代表机电一体化技术的机器人、加工中心(MC:Machining Center)、数控机床等机械。通过运用CAD/CAM等计算机辅助设计/制造系统，将这些机械组成生产线，实现工厂的自动化。

17 流程图的编制

要点 编制程序的第一步是绘制程序流程图。

解释

流程图与算法

为解决某一问题而采取的处理方法与步骤称为算法(algorithm)。将算法用图形表达出来就是**流程图**(flowchart)。按照流程图编制程序可以防止发生逻辑错误,也便于他人读懂自己所编写的程序。

流程图

流程图符号

信息处理流程图

在日本标准JIS X 0121"**信息处理流程图**"中规定了26种符号。在图2.78中仅列出了部分常用符号,其中经常使用的几种符号介绍如下。

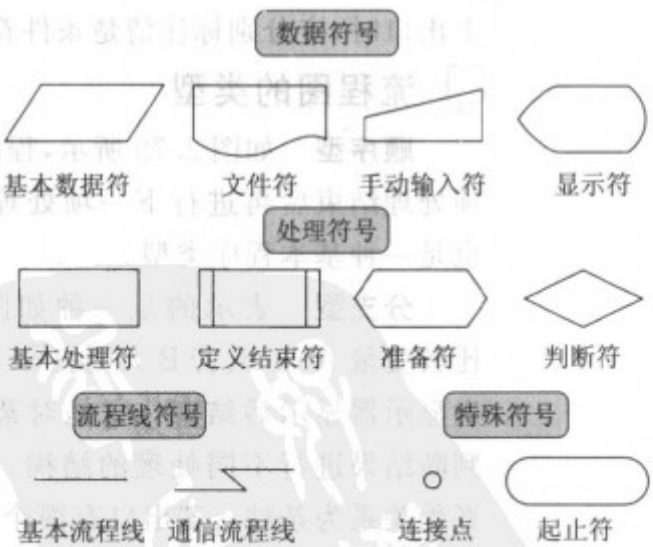


图2.78 信息处理流程图符号

手动输入
文件 显示

① 数据符号:通常作为输入、输出符号使用。当需要特殊指定输入、输出方法时,可以分别使用**手动输入**(从键盘输入等)、**文件**(打印输出等)、**显示**(CRT等)等特殊符号。此外,还有表示内部存储器、外部存储设备、读卡机、穿孔纸带等符号。

② 处理(process)符号:用于表示从四则运算到数据传

送等几乎所有的处理操作，但准备、判断等需要使用特殊符号。

③ 准备符号：用于设定初始值的存储位置。

④ 判断符号：是一种特殊的处理符号，是当需要根据某种条件进行判断并对程序进行分支处理时所使用的符号。

⑤ 流程线：表示各符号间的执行顺序。为清楚起见，常在流程线上加一个表示顺序方向的箭头。

⑥ 连接点：不是必须使用的符号，当流程图跨越两张纸时，用于表示来源及去处的衔接点。

⑦ 起止(terminal)符号：用于表示程序的开始、结束及停止等。

绘制流程图的规定

原则上规定流程图应按从左至右、从上到下的方向绘制。当流程方向与原则约定方向相反时，应尽量用箭头表示。如条件分支那样，当从一个流程图符号上引出两个以上出口时，应分别标注清楚条件符号。

流程图的类型

顺序型　如图2.79所示，程序从“开始”到“结束”，是一项处理结束后再进行下一项处理的单线式逐次处理方式，也是一种基本程序类型。

分支型　表示的是一种如图2.80所示的程序结构。比较变量A与B，若B大则打印B值后结束；否则，将A值送显示器显示后结束。它是对某一条件进行判断，并根据判断结果进行不同处理的结构。判断时，可以用大小或者真伪关系为条件。若出口有两个，则称之为单分支；若出口有多个，就称之为多分支。此外，判断的条件不仅可以采用B>A的形式，还允许采用10≤B≤20这种复合型条件。

循环型　如图2.81所示，这是一种将分支出口中的一个返回至原流程线某处的结构，称为循环处理或重复处理。循环处理的基本模式为，当满足以下要求：

① 循环固定次数。

② 运算结果符合要求。

③ 数据输入结束。

等规定的条件时，则退出循环。在图 2.81 中，规定当输入为 0 时退出循环。

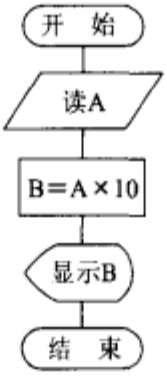


图 2.79　顺序型

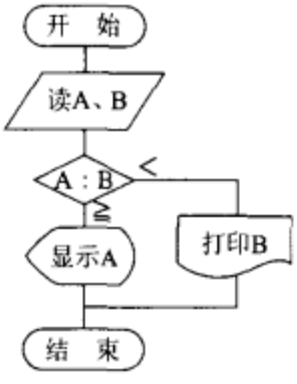


图 2.80　分支型

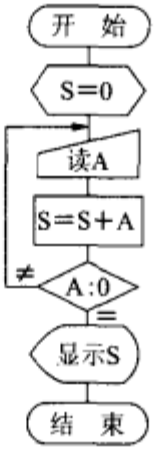


图 2.81　循环型

相关知识

◆算　法

算法一词源于 9 世纪阿拉伯数学家阿·佛利兹密（AL-Khuwarizme）的名字。

在处理某一问题时，可以将处理过程分为计划过程及编码过程（用编程语言进行描述）两种过程，这两种过程合在一起称为编程（programming）。在编程过程中，算法的作用极为重要。

例　题

试用流程图描述下列问题。

[1] 明天早晨去棒球场参加棒球比赛。

① 早晨起床后，若下雨就去看电影。

② 若天晴，就去棒球场。

③ 若场地潮湿不能比赛，就去打保龄球。

④ 若场地能用，就进行比赛。

[2] 给家人买感冒药服用。

① 确定患者年龄，成人服 4 片。

② 6 岁以下患者，不予服用。

③ 12 岁以下患者，服 1/4 片。

④ 18岁以下患者，服半片。

⑤ 70岁以上患者，也服半片。

⑥ 一日服3次，持续2天。

18 硬件基础

要 点

硬件在广义上是指构成计算机系统的物理部件、机器和装置。但在这里是特指计算机控制所需要的输入、输出接口电路和其他控制电路等。

解 释

硬 件

与计算机系统有关的硬件范围非常广，但与控制有关的几乎都在接口(I/F：InterFace)部分。

计算机系统的各种硬件，都有各自固有的信号形态、独立的电学参数，为了传输数据，需要将这些各不相同的信号进行匹配、变换，而构成相互连接电路的就是**接口电路**。

接口电路

CPU 外围电路

实现 CPU 功能的电路有如下几种：

时钟电路 将动作的同步脉冲取出，提供给 CPU。

复位电路 恢复到系统初始状态的电路。

地址译码器 选择存储器和外围 LSI 输入/输出接口等的电路，将 CPU 的地址数据和控制信号组合制成选择信号。

缓存器 是增强数据信号的电路，需使用专用 IC。

收、发两用电路 是两个方向的缓存器，需使用专用 IC。

外围 LSI 是 CPU 与其外围设备及其之间进行数据交换的专用 LSI，现在大多已经与 CPU 或 PIC 等芯片制成一体。有串行输入、输出用的，也有并行输入、输出用的，可在内部安装的控制寄存器上写入数据，进一步扩展了使用的自由度。典型的 LSI 有并行输入、输出用的 8255 和 6820，还有串行输入、输出用的 8251 和 6821 等。

输入电路(无颤动)

颤动

机械开关进行开与关的转换时，触点**颤动**产生的噪声会导致误动作。无颤动电路能消除这种噪声并进行整形。

转换电路

光电、热电和机电等自然界的物理量必须要转换成电

流或电压，才能被电路所利用。

OP放大电路　用于传感器输出较小时的增幅，非比例关系时的修正。

A/D转换　将温度、流量和时间等的瞬时值按时间分割，转换为数字量。

输出电路

功率驱动电路　是驱动需要大电流的执行装置时使用的专用功率驱动电路。

D/A转换器　CPU处理的结果是数字化的数据，还需要转换为模拟量才能输出。

脉冲宽度调制电路

PWM电路　称为**脉冲宽度调制电路**(Pulse Width Modulation)，是使流过负载的电流的宽度与振幅成比例的脉冲驱动电路。常用于电机的转动控制。

连接电路

数据通信电路　通过有线或无线进行数据交换的电路。

电平转换　若直接将电压不同的电路相互连接会破坏电路，所以需要有调整电路。通常使用晶体管或专用IC。

IC的连接　因为IC有不同的规格、各自的电压范围和阻抗等，所以，当不同的IC相互连接时需要特别注意。

实装技术

用连接电缆和插头等连接器连接CPU和周边电路时，必须使用与其规格相对应的零、部件；否则，容易产生噪声，使信号劣化，甚至产生误动作。

相关知识

◆ 固化软件

通常将写入ROM或CD-ROM中的程序称为固化软件(firmware)，固化软件是介于软件与硬件之间的媒体。

严格地讲，固化软件是指固化有机器语言的微程序和一部分操作系统(OS)的程序。

19 软件基础

要 点

计算机在具有了执行元件与电子元件及驱动这些元件工作的程序(软件)之后,才真正成为一个系统。程序所描述的是计算机进行处理的顺序。操作系统及应用软件都是一些大规模的程序。

解 释

程序语言

程序语言

描述程序用的人工语言称为**程序语言**(programming language)。在程序语言中,有机器能够直接解读的机器语言以及便于人们理解的符号化语言,符号化语言包括汇编语言(assembly language)及高级语言。

机器语言

机器语言是计算机能够直接解读并执行的由"0"和"1"组合来描述程序的语言。

汇编语言

助记符

汇编语言是使用容易记忆的相关符号(**助记符**)来替换机器语言中各指令,从而构成的一种程序语言。例如,用ADD表示加法(ADDITION)指令、用JMP表示跳转(JUMP)指令,与机器语言相比,采用汇编语言编写程序,能大大提高编程效率。将用助记符描述的程序转换成机器语言的程序称为**汇编程序**(assembler)。转换前的程序称为**源程序**,转换后的程序称为**目标程序**,转换过程如图2.82所示。

汇编程序
源程序
目标程序

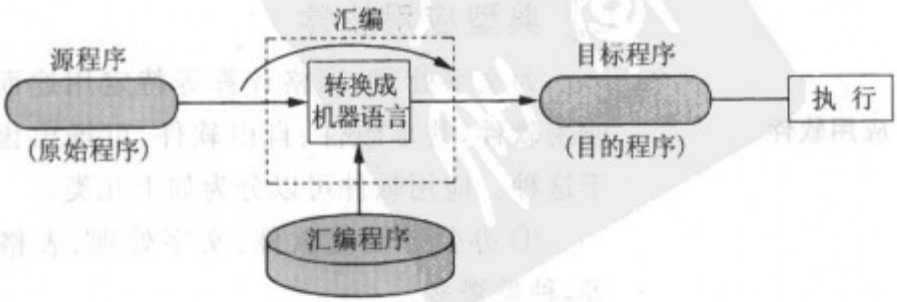


图2.82 汇编程序的执行过程

指令的助记符表示方法因 CPU 的不同而异，因此同一程序在其他的 CPU 上就可能无法执行。可见，汇编语言程序的可移植性较差。

高级语言

高级语言
FORTRAN 语言
BASIC 语言
C 语言

用人们日常生活中使用的语言来描述程序的语言称为**高级语言**。典型的高级语言有：用于科学计算的 **FORTRAN 语言**；用于办公处理并具有较长历史的 COBOL 语言；人们熟知的面向初学者的会话型 **BASIC 语言**；以及通用的 **C 语言**等多种。高级语言的转换和执行过程如图 2.83 所示。

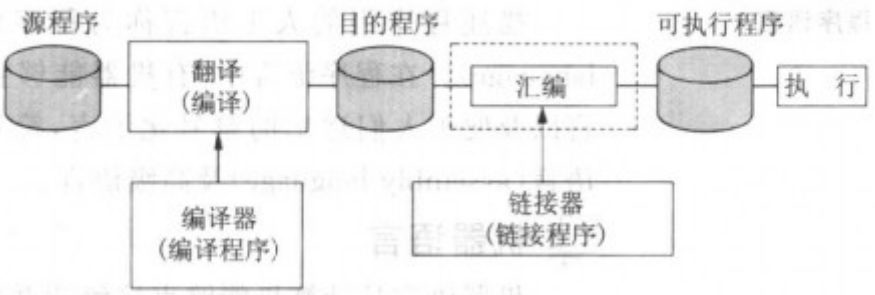


图 2.83　高级语言的转换和执行过程

操作系统的概念

基本软件

操作系统(OS:Operating System)也称为**基本软件**。在计算机系统中，OS 是一种最接近硬件的软件，由它管理组成系统的所有设备，从而得以使系统能够高效和顺畅地进行处理。

操作系统能够对键盘、显示器、存储器及输入/输出设备进行控制和管理，具有分配系统资源、进程管理、文件管理等多种功能。人们熟悉的 OS 有 UNIX、Msc OS、Windows 等操作系统。

典型应用软件

应用软件

为文字处理、表格计算等特定用途而开发的程序称为**应用软件**，共享软件、自由软件、市场出售的专用软件都属于这种。应用软件可以分为如下几类。

① 办公自动化软件：文字处理、表格计算和会计软件等，种类繁多。

② CAD/CAM：机械、建筑及电气等的设计和机械加工

用的软件。

③ 多媒体：音乐、电影和图片等软件。

④ 浏览软件：网上浏览的软件。

⑤ DTP：电子出版用的排版软件。

⑥ 面向家庭和教育的软件：如家庭记事簿、健康顾问和菜谱等，以及学习辅助软件。

⑦ 语言和开发工具软件：与语言对应的程序编制器及支持程序。

此外，还有数据库、显示、科学仿真、财务软件、通信软件及网页管理软件等。

编辑器的概念

编辑器

具有从计算机终端将程序及文档按文本形式进行录入，并能对这些文本文件进行添加、删除、修改、复制、移动等编辑操作，形成可输出文档功能的程序称为**编辑器**(editor)。编辑器能在分析行文法结构的同时将录入的内容制成程序用的文本文件，是程序开发中一种强有力的工具。

硬件记述语言

硬件记述语言

硬件记述语言(HDL：Hardware Description Language)是程序语言的一种，是设计 ASIC 和 PLG 等逻辑电路用的语言。HDL 有许多种类，以美国国防部开发的 VHDL(Very high speed integrated circuit HDL)和 Gateway Design Automation 公司开发的 Verilog HDL 最有名。都是根据 IEEE 进行了标准化。进行复杂的 LSI 逻辑设计时，常使用 HDL。与原来的设计相比有许多优点：如原文输出，使设计变得容易；修改变电路简单，可大大提高工作效率等。

相关知识

◆C 语言

C 语言是美国贝尔实验室在开发 UNIX 操作系统时，由丹尼斯 M. 里奇(Dennis M. Ritchie)与肯尼恩·汤姆逊(Kenneth Tompson)开发的一种编程语言。C 语言有以下几个特征：

① 具有很多接近机器语言的指令，可实现高效的小循环描述。

② 语言简洁。

③ 程序以函数为基本模式。

④ 加强了编译程序的优化，实际执行速度较快。

⑤ 符合 ANSI(美国国家标准协会)标准，在源程序级的可移植性好。

20 数据通信与LAN/网络基础

要 点

在计算机与其他终端或设备之间按照规定的通信公约(protocol,协议)进行数据的传递,将其称之为数据传输。传输方式有串行和并行方式、基带和宽带方式等许多种方法。另外,通过LAN还可以有效地利用计算机和信息资源。

解 释

串行传输与并行传输

串行传输方式

串行传输方式 将一组数据存放到寄存器中,在寄存器的一端每隔一定的时间间隔发送1位的方式。这种传输方式典型的协议有RS-232C。

并行传输方式

并行传输方式 这种方式需要准备传送数据的专用传输线,可将所有位一次发送。另外,不要试图进行并行方式和串行方式的转换,因为增加电缆线是不经济的做法。

同步方式

在传输数据时,为了使发信方和收信方取得同步,需要附加同步信号。

同步传输方式

同步传输方式 同步传输方式是将传送的数据与同步信号并行传输,在收信方则是以同步信号计时,并接收数据。

非同步传输方式

非同步传输方式 在需要传送数据的开头附加开始位"0",在最后附加结束位"1"。当收信方检测出开始位时,开始计时,并接收数据;检测到结束位时,结束接收。

传输速度

调制速度

调制速度 所谓调制速度是指在传送数据时,每秒钟进行调制的次数,单位是波特(baud)。

信号速度

信号速度 是在1s内能够传送数据的位数。使用二进制符号时,如果1个脉冲宽度为T(s),则信号速度S为$S=1/T$。单位是比特/秒(bit/s或bps等)。

微机的数据传输标准

IEEE1284

IEEE1284 打印机上使用的个人计算机用打印输出规

格是从8位并行接口开始，经过功能强化，1994年以后能够连接打印机以外的其他设备。插头使用14/24/36针。

EIA-232(RS-232C)

EIA-232(RS-232C) 1969年美国EIA根据CCITT公告制定了调制解调器用的同步和非同步串行接口的标准规格。使用9/15/25/37针插头。

并行SCSI

并行SCSI SCSI是Small Computer System Interface的缩写。原来是用于小型计算机的辅助存储器用接口，但现在已作为ANSI的通用接口标准化。ANSI总线由数据线和控制线各9条构成，总线最多可连接8台设备，插头为50针。

串行SCSI(IEEE1394)

串行SCSI(IEEE1394) 1986年苹果公司开发的硬盘接口规格是串行接口，称为Fire Wire。传输速度为100Mbit/s、200Mbit/s、400Mbit/s，连接形式为树形或菊花链结构，一个端口最多可连接64台设备。柔性较大，可用于音频或动态图像的接口。插头有标准的6针和小型化的4针，如图2.84所示。



图2.84 IEEE1394插头

USB

USB(Universal Serial Bus) 是个人计算机用的接口，1993年由Intel公司等共同开发，从Windows98开始使用。为6层树型结构，可连接128台设备。插头为信号线和电源线各一对的4个端子。入口侧的插头为A型，出口侧的插头为B型，有各种不同的形状，如图2.85所示。电源供给是由入口到出口。电压为5V±5%，每个500mA，共5A。扩展到USB 2.0时，传输速度已达到480Mbit/s。

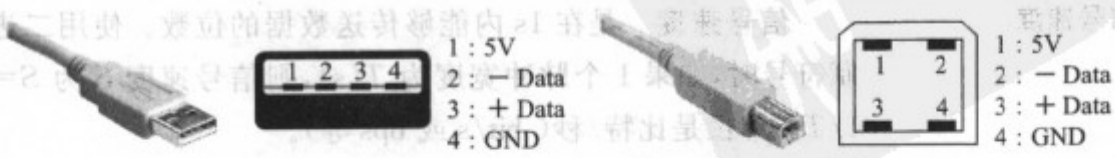


图2.85 USB插头和端子

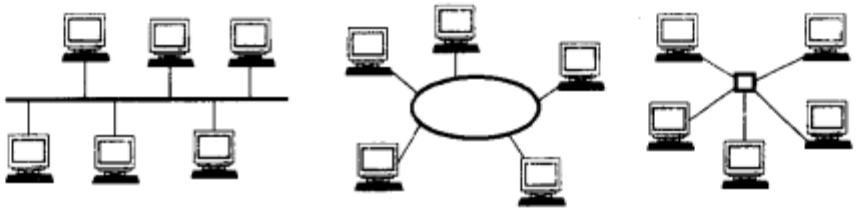
LAN

LAN

LAN(Local Area Network,局域网)是连接在地基、广场或建筑物等较小范围内分散配置的计算机或各种设备,进行数据交换的网络形态。LAN能够有效地利用信息设备:通过各装置间的相互连接来管理和传输文件;分散负载;资源共享等。

网络布局(连接形态)

如图2.86所示,典型的LAN连接方式有总线型、环型和星型三种。



(a)总线型　　(b)环　型　　(c)星　型

图2.86　网络连接形态

服务器与客户机

服务器　客户

在计算机网络中由特定的计算机向其他的计算机提供信息和提供某种功能时,将提供服务的计算机或设备称为**服务器**(server),而接受服务的计算机则称为**客户**(client)机。服务器的种类很多,有对客户机共享数据的文件服务器、进行打印的打印服务器、交换数据的通信服务器、与互联网连接的Web服务器及安全服务器等。

点对点

点对点

在计算机网络中的计算机,不仅有服务器与客户机的上下关系,还有两台设备之间对等关系的连接,叫做**点对点**(peer to peer)的连接,也可以用P2P表示。

连接机器

① LAN接头:在PC上有与LAN安装的接口螺钉。

② 中继器:在传输距离较长时,用于增强信号的装置。

③ 网桥:是LAN之间的连接装置之一。

④ 路由程序：通过连接 LAN 的中继装置，使之具有寻找快捷路径的程序安排功能。

⑤ 路由器：具有在不同的网络间搭桥的协议转换功能和**防火墙**功能。

防火墙

电缆和插头

以太网　电缆

LAN 的连接使用 IEEE802.3 中规定的**以太网**(Ethernet)**电缆**。使用的电缆有光纤、同轴线和双绞线等，根据其特性有 10BASE-5 和 100BASE-T 等规格(见表 2.10)。电缆的前几位数字表示最大传输速度，BASE 是基带方式，后面的数字表示最大传送距离，T 表示双股纽绞电缆。

表 2.10　电缆的规格、1000BASE-T 电缆和 RJ45 插口

	10BASE-5	10BASE-2	10BASE-T	100BASE-T	1000BASE-T
最大传送距离	500 m	185 m	100 m	100 m	100 m
最大传送速度	10 Mbps	10 Mbps	10 Mbps	100 Mbps	1 Gbps
电缆种类			UTP, STP	UTP, STP	UTP, STP
插　头	AUI	BNC	RJ45	RJ45	RJ45



相关知识

◆ 以太网

以太网是 1976 年 XEROX 公司的 Palo Alto 研究所设计的 LAN 规格。后来由 DEC、国际通信卫星组织和 XEROX 三家公司共同标准化，称为 IEEE802.3 标准。特点是采用了 CSMA/CD 冲突检测装置。最初是 10Mbit/s 的 LAN 规格，现在已经有高速 Fast Ethernet(100Mbit/s)和 Gigabit Ethernet (1000Mbit/s)，称为以太网。

第3章

机械零件与机构

● 责任编委
矢吹隆一郎
● 执　　笔
矢吹隆一郎(1~5)
津野章久(6~11)

机器人是典型的机电一体化产品。如第1章所述，如果将机器人比作人体，那么机构就相当于人体的骨骼。

本章以机器人的机构为核心，从基础技术到实际应用进行了详细介绍。联轴器在机器人上很少应用，离合器等零件的使用也几乎没有，所以在此不作介绍，而将直动机构一节作为向执行机构的过渡。

本章的重点是关于机器人的设计和制造，可以作为机电一体化的一般知识进行学习。为了能够达到利用简单的设备自己制作机器人的目的，应将机构作为重点学习。

1　机械运动及坐标系

要　点

机器人的机构是一种具体的机电一体化的机构。将机器人按机构分类，可分为以下四种：

① 直角坐标系机器人。

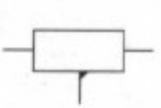
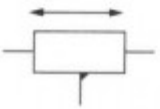
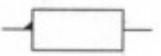
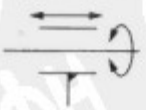
② 圆柱坐标系机器人。

③ 极坐标系机器人。

④ 多关节机器人。

工业机器人的普及非常迅速，作为其标准化的一个方面，所采用的符号也已经实现了标准化（见表3.1）。

表3.1　表示机器人运动功能的符号

序　号	名　称	自由度	图形符号	运动方向（参考）	备　注
1	直线运动关节(1)	1			
2	直线运动关节(2)	1			
3	旋转关节(1)	1			
4	旋转关节(2)	1			平面
5		1			立体
6	圆柱关节	2			
7	球关节	3			

(JIS B 0138:1996)

解 释

直角坐标系机器人

直线运动

直角坐标系机器人

所有运动都是由直线运动机构实现的机器人称为**直角坐标系机器人**，如图 3.1 所示。所谓**直线运动**就是伸缩运动，由 X、Y、Z 三个坐标方向上的移动来确定机器人的位置，动作范围由各直线动作范围决定。其特点是结构简单，控制方便。

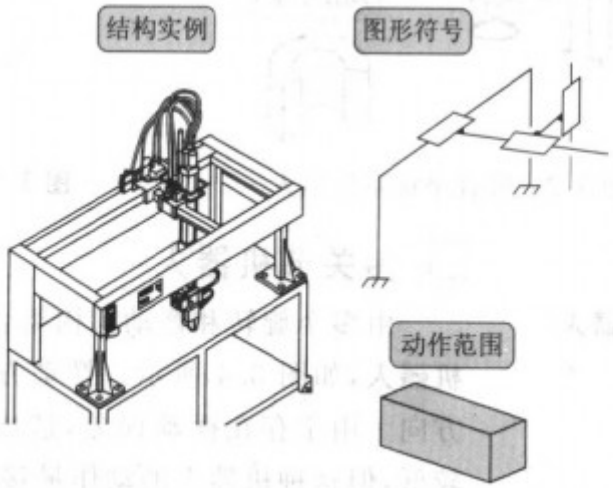


图 3.1 直角坐标系机器人

圆柱坐标系机器人

圆柱坐标系机器人

旋转运动

由一个旋转运动和两个方向上直线运动(铅垂方向和水平方向)的三种运动机构组合而成的机器人称为**圆柱坐标系机器人**，如图 3.2 所示。**旋转运动**是指构件绕自身的固定轴线旋转的运动。圆柱坐标系机器人的动作范围要比直角坐标系机器人的大，但可能会因为臂杆的自重而产生动作误差。

极坐标系机器人

极坐标系机器人

摆动

由旋转、摆动和直线运动三种运动机构组合而成的机器人称为**极坐标系机器人**，如图 3.3 所示。**摆动**是指构件的轴线绕另一轴线回转的运动。极坐标系机器人的特点是节省空间。

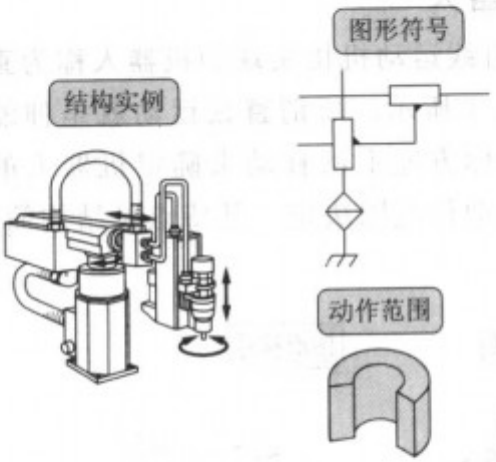


图 3.2　圆柱坐标系机器人

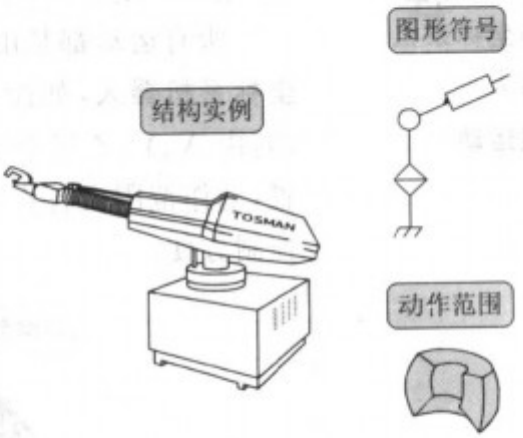


图 3.3　极坐标系机器人

多关节机器人

多关节机器人

由多个旋转和摆动机构组合而成的机器人称为**多关节机器人**，如图 3.4 所示。摆动方向可分为铅垂方向和水平方向。由于存在摆动误差，造成多关节机器人的运动精度较低，但这种机器人的动作最接近人的动作，适用于进行喷漆、装配和焊接等项作业。



图 3.4　多关节机器人

相关知识

◆ 极坐标

在以 O 为原点的直角坐标系中，从任意点 P 向 x-y 平面作垂线 PM，设 $OP=r$，$\angle xOM=\varphi$，$\angle zOP=\theta$，则 P 的位置由 r、φ、θ 决定，r、φ、θ 称为点 P 的极

坐标，用 $P(r,\varphi,\theta)$ 表示，如图 3.5 所示。

如果点 P 的极坐标为 (r,φ,θ)，直角坐标为 (x,y,z)，则

$$x=r\sin\theta\cos\varphi$$

$$y=r\sin\theta\sin\varphi$$

$$z=r\cos\theta$$

各坐标之间的关系为

$$r^2=x^2+y^2+z^2$$

$$\tan\varphi=y/x,\ \tan\theta=(x^2+y^2)^{1/2}/z$$

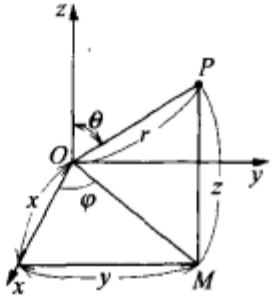


图 3.5 极坐标

2　螺纹的原理与应用

要　点

螺纹必须是内螺纹和外螺纹成对使用才能够实现各种预定功能，通过内、外螺纹的相互滑动接触能够起到拧紧或传递运动的作用。螺纹按其断面形状可分为三角形螺纹、梯形螺纹和弧形螺纹等。

解　释

螺旋线

螺旋升角

单线螺纹

多线螺纹

螺距

导程

螺旋线

将直角三角形 ABC 按图 3.6 所示的方法卷在圆柱上，直角三角形的斜边 AC 在圆柱上形成的曲线称为**螺旋线**，斜边的倾斜角 θ 称为**螺旋升角**。螺旋线是螺纹的基本曲线，螺纹按螺旋线卷绕的方向可分为右旋螺纹和左旋螺纹。一条螺旋线的螺纹称为**单线螺纹**，两条以上螺旋线的螺纹分别称为双线螺纹、三线螺纹等，统称为**多线螺纹**。在圆柱轴线方向测量的螺旋线之间的距离称为**螺距**，螺纹旋转一周沿轴向移动的距离称为**导程**。

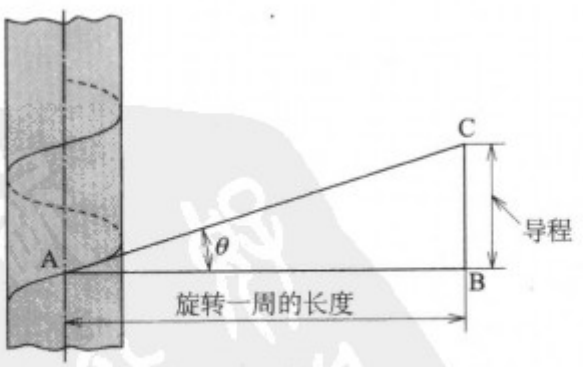


图 3.6　螺旋线

斜面原理

如图 3.7 所示，螺纹的工作原理可以认为与放在斜面上的物体沿斜面被上下推动时的作用相同。

拧紧螺纹时的受力分析　拧紧螺纹时的受力状态就相当于在图 3.7 所示的斜面上，用水平方向的力 F 推动负载 W 向上移动时的受力状态。下面介绍水平力 F 的求法。

如图 3.8 所示，分别将 W 和 F 分解为平行斜面和垂直

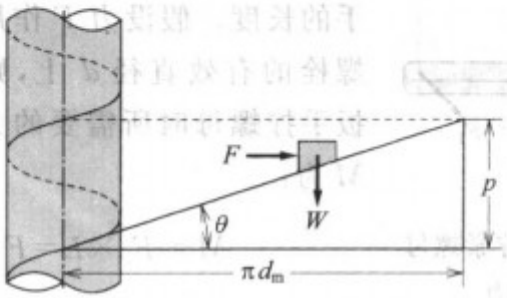


图 3.7 斜面原理

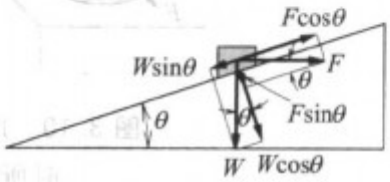


图 3.8 拧紧螺纹时的受力分析

斜面的两个方向上的分力，其中，垂直斜面方向的合力为 $(F\sin\theta+W\cos\theta)$。如果斜面的摩擦因数为 μ，则摩擦力 f：

$$f=\mu(F\sin\theta+W\cos\theta)。$$

考虑到力在斜面方向的平衡关系，可得

$$F\cos\theta=f+W\sin\theta=\mu(F\sin\theta+W\cos\theta)+W\sin\theta$$

所以

$$F\cos\theta-\mu F\sin\theta=W\sin\theta+\mu W\cos\theta$$

$$F(\cos\theta-\mu\sin\theta)=W(\sin\theta+\mu\cos\theta)$$

$$F=W\frac{\sin\theta+\mu\cos\theta}{\cos\theta-\mu\sin\theta}$$

$$=W\frac{\tan\theta+\mu}{1-\mu\tan\theta}$$

摩擦角

设**摩擦角**为 ϕ，则

$$\mu=\tan\phi$$

于是可以得到

$$F=W\frac{\tan\theta+\tan\phi}{1-\tan\theta\tan\phi}$$

$$=W\tan(\phi+\theta)$$

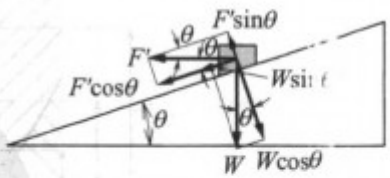


图 3.9 松开螺纹时的受力分析

松开螺纹时的受力分析 松开螺纹时的受力状态就相当于在图 3.9 所示的斜面上，用水平方向的力 F' 推动负载 W 向下移动时的受力状态，力 F' 的求法与 F 的求法相同，于是可以得到

$$F'=W\frac{\tan\theta-\tan\phi}{1+\tan\theta\tan\phi}=W\tan(\phi-\theta)$$

拧紧螺纹时的力矩

如图 3.10 所示，d 为螺栓的有效直径，F 为拧紧力，F_1

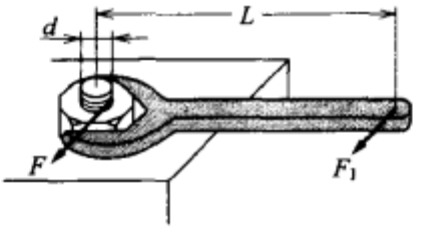


图 3.10　用扳手拧紧螺母时所需要的力

为作用在扳手上的力，L 为扳手的长度。假设力 F 作用在螺栓的有效直径 d 上，则用扳手拧螺母时所需要的力矩 M 为：

$$M = F_1 \times L = F\frac{d}{2} = \frac{d}{2}W\tan(\phi+\theta)$$

故作用在扳手上的力 F_1 为：

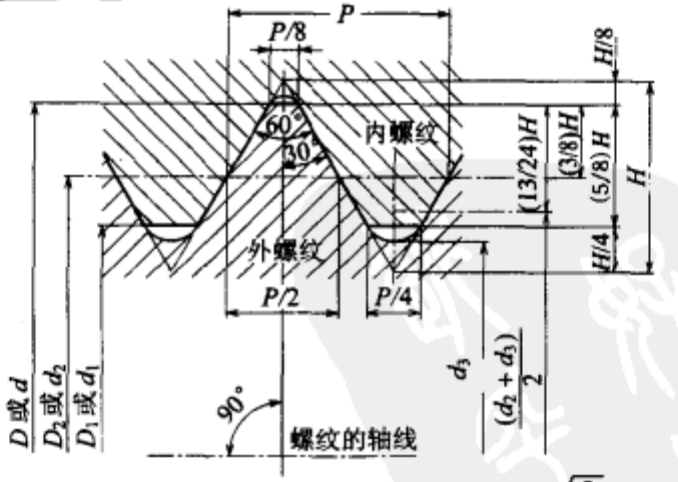
$$F_1 = \frac{dW}{2L}\tan(\phi+\theta)$$

公制普通螺纹

公制普通螺纹应用最广，常作为连接螺纹使用。表 3.2 所列为公制普通螺纹的基本尺寸。

表 3.2　公制普通螺纹的基本尺寸

单位：mm



注：粗线表示基本牙型

D：内螺纹的牙底直径（公称直径）
d：外螺纹的外径（公称直径）
D_2：内螺纹的中径
d_2：外螺纹的中径
D_1：内螺纹的小径
d_1：外螺纹的小径
H：整三角形高度
P：螺距
A_s：有效截面积

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2}P = 0.866025404P$$

$$d_2 = d - 2\times\frac{3}{8}H = d - 0.6495P$$

$$d_1 = d - 2\times\frac{5}{8}H = d - 1.0825P$$

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6}$$

$$A_s = \frac{\pi}{4}\left(d_1 - \frac{13}{12}H\right)^2$$

续表 3.2

公称直径 D,d		螺距 P		中径 D_2、d_2	小径 D_1	有效截面积 A_s/mm^2
第1选择	第2选择	粗牙	细牙			
1		0.25		0.838	0.729	0.460
1.2		0.25		1.838	0.929	0.732
	1.4	0.3		0.205	1.075	0.983
1.6		0.35		1.373	1.221	1.27
	1.8	0.35		1.573	1.424	1.70
2		0.4		1.740	1.567	2.07
2.5		0.45		2.208	2.013	3.39
3		0.5		2.675	2.459	5.03
	3.5	0.6		3.110	2.850	6.78
4		0.7		3.545	3.242	8.78
5		0.8		4.480	4.134	14.2
6		1		5.350	4.917	20.1
	7	1		6.350	5.917	28.9
8		1.25		7.188	6.647	36.6
			1	7.350	6.917	39.2
10		1.5		9.026	8.376	58.0
			1.25	9.188	8.647	61.2
			1	9.350	8.917	64.5
12		1.75		10.863	10.106	84.3
			1.5	11.026	10.376	88.1
			1.25	11.188	10.647	92.1
	14	2		12.701	11.835	115
			1.5	13.026	12.376	125
16		2		14.701	13.835	157
			1.5	15.026	14.376	167
	18	2.5		16.376	15.294	192
			2	16.701	15.835	204
			1.5	17.026	16.376	216
20		2.5		18.376	17.294	245
			2	18.701	17.835	258
			1.5	19.026	18.376	272
	22	2.5		20.376	19.294	303
			2	20.701	19.835	318
			1.5	21.026	20.376	333
24		3		22.051	20.752	353
			2	22.701	21.835	384

(JIS B 0205-3:2001, JIS B 0205-4:2001, JIS B 1082:1987)

螺纹的应用

双向螺旋　如图 3.11 所示，在螺杆或中空的螺母两端分别制成左旋螺纹和右旋螺纹，将螺母向一个方向转动时，两端将同时缩进或者同时伸出，这种机构称为**双向螺旋机构**。由于其结构简单，所以在机械手中应用较多。

双向螺旋机构

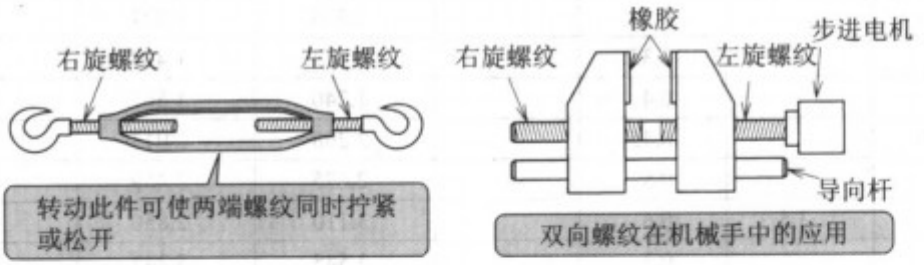


图 3.11　双向螺旋

建筑用长螺杆　最近出现了大规模的郊外建筑器材商店，那里的建筑用长螺杆非常便宜，甚至有像表 3.2 中第 1 选择中长度达 300～1000mm 的螺杆。将其应用于简单的机器人上，可以组成大移动量的机构，使用非常方便（见图 3.12）。

滚珠丝杠　将螺纹的轴截面形状设计成圆弧形，在螺母和螺杆之间的螺旋沟槽中放入一排滚动轴承用的小钢球就构成了**滚珠丝杠**。钢球从螺母一端排出，通过螺母中的孔道可以返回螺母另一端的沟槽中。由于滚珠丝杠的摩擦力小，所以常作为直线运动的驱动丝杠使用（见图 3.13）。

滚珠丝杠

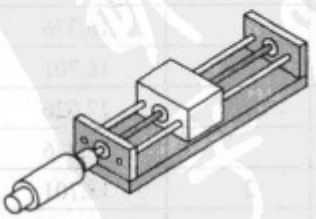


图 3.12　建筑用的长螺杆

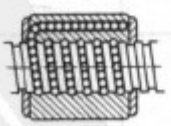


图 3.13　滚珠丝杠

相关知识

◆ 导轨一体型滚珠丝杠

在机器人中，将支承和连接运动部分的机构称为关节，滑动连接的称为直

动关节，转动连接的称为旋转关节。直动关节由直线运动机构和为其导向的导轨组成，导轨一体型滚珠丝杠就是直动关节的一个典型例子(见图 3.14)。

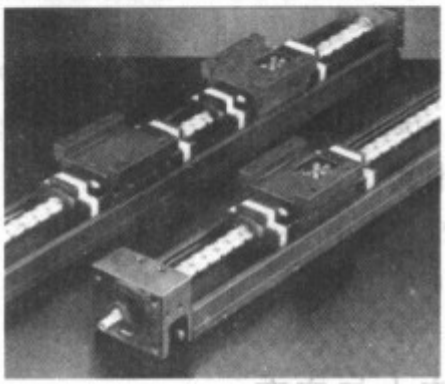


图 3.14 导轨一体型滚珠丝杠

3　弹簧及其作用

要　点

一般的机械零、部件所使用的材料都存在一定的弹性，弹簧(spring)就是根据应用场合和使用目的的不同将弹性材料制成适当形状来充分利用其弹性的零件。弹簧作为重要的机械零件，应用范围很广，当然在机器人的机械中也有大量使用。

解　释

应力与应变

应力-应变曲线

胡克定律

从第2章2.3节所述的**应力-应变曲线**上可以看出，当应力较小时，应变与应力成正比，这一规律称为**胡克**(Hooke)**定律**。在不超过弹性极限的范围内，材料上的应力消除时，应变也随之消除，物体将恢复到原来的形状。

弹簧　弹性力

从广义上讲，所有以材料的弹性作为使用功能的机械零件都可称为**弹簧**。由弹簧的弹性产生的力(即**弹性力**)称为弹簧力。

胡克定律

若将弹簧的一端固定，拉住另一端使其从自由长度伸长 x，则所需要的拉力为 $F(x)$(见图3.15)。若在弹簧的末端悬挂一重物，那么伸长了 x 的弹簧就会对重物作用一个反力 $-F(x)$。当弹簧的变形长度相对于其自由长度足够小时，$F(x)$ 与 x 成正比。即

$$F(x)=kx$$

这种关系就是胡克定律。其中的比例系数 k 称为弹簧常数或弹簧刚度。

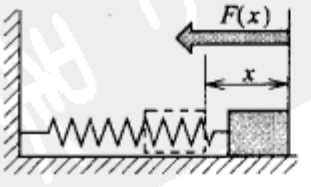


图3.15　胡克定律

相关知识

◆ 快速夹紧

分析机器人上利用弹簧的情况可以发现，利用弹簧最多的部位是其手部。从安全的观点出发，可将机器人的手爪设计成用弹簧力夹紧物体的结构，这与一般的概念相反，执行装置只是起到将手爪张开的作用。这样设计，在紧急停电或因故障断电时，可以防止被抓起的物体意外下落而造成事故（见图 3.16）。

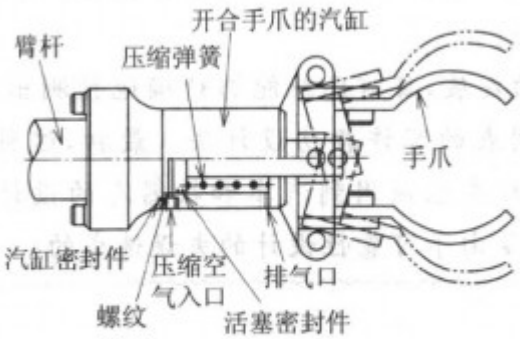


图 3.16 利用弹簧力的快速夹紧机构

◆ 步进电机

大多数的机器人都使用步进电机。但是，在由步进电机驱动的机器人上，当驱动电源断开时，步进电机将处于自由转动状态，机器人的臂部就会在重力作用下向下摆动，有时会破坏限位开关等零件。为了防止这种情况的发生，可以采用如图 3.17 所示的结构，在臂部齿轮上安装一个螺旋弹簧来平衡臂部的重力。

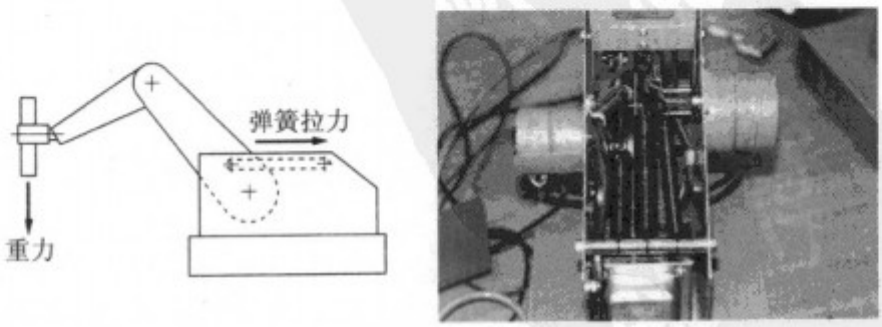


图 3.17 安装在机器人肩部齿轮上的螺旋弹簧

题外话

可靠性设计

在设计中，从安全的角度出发，应考虑到即使机构的一部分产生疲劳裂纹等问题，也不会导致整体上的致命破坏，这种设计方法称为可靠性设计(fail safe)。

实际上，可采用多个构件分担负载或双重机构等措施来实现。但无论如何，都必须采取适当的检修措施，以便及时发现和维修出现的问题，这样才能够真正保证安全。

随着断裂力学的发展，目前已经能够精确地预测出允许裂纹的大小，并且采用制定检查时间表的容许损伤设计法。最初，这种设计方法是在飞机设计中首先使用的，现在已应用到汽车和机器人的设计上。1985年的日航飞机事故，就被认为是由于可靠性设计的失误造成的。

4 轴和轴承及其工作原理

要 点

在机械中，必须使用各种轴类零件来传递动力和各种运动。为了支承轴类零件需要使用轴承；要使所传递的运动可靠就需要使用键。

本节将介绍轴的应力分析、功率传递及轴承的种类等方面内容。

解 释

轴的应力分析

设 T 为扭矩，M 为弯距，τ 为外缘处扭转剪应力，σ_b 为外缘处弯曲应力，d 为实心轴的直径，d_1、d_2 分别为空心轴的内径和外径，$n=d_1/d_2$ 为空心轴的内径与外径之比，则轴的应力分析如下。

扭转应力及弯曲应力

① 实心轴

$$\tau=16T/\pi d^3\approx 5.1T/d^3$$

$$\sigma_b=32M/\pi d^3\approx 10.2M/d^3$$

② 空心轴

$$\tau=16Td_2/[\pi(d_2^4-d_1^4)]$$

$$\approx 5.1T/[(1-n^4)d_2^3]$$

$$\sigma_b=32Md_2/[\pi(d_2^4-d_1^4)]$$

$$\approx 10.2M/[(1-n^4)d_2^3]$$

轴的扭转与弯曲组合应力 若设 τ_{max} 为最大剪应力，σ_{max} 为最大主应力，则

$$\tau_{max}=(1/2)\sqrt{\sigma_b^2+4\tau^2}$$

$$=\{16/[\pi(1-n^4)d_2^3]\}\sqrt{M^2+T^2}$$

$$\approx 5.1T_e/[(1-n^4)d_2^3]$$

$$\sigma_{max}=(1/2)\sigma_b+(1/2)\sqrt{\sigma_b^2+4\tau^2}$$

$$=\{16/[\pi(1-n^4)d_2^3]\}(M+\sqrt{M^2+T^2})$$

$$\approx 10.2M_e/[(1-n^4)d_2^3]$$

其中对于实心轴 $d_2=d$，$n=0$。此外，$T_e=\sqrt{M^2+T^2}$ 称为当量扭矩，$M_e=(1/2)(M+\sqrt{M^2+T^2})$ 称为当量弯矩。

扭矩、弯矩和轴向力组合作用时轴上的应力分析　设 P 为轴向力，$\sigma_n=4P/[\pi(1-n^2)d_2^3]$ 为轴向应力，则

$$\begin{aligned}\tau_{max}&=(1/2)\sqrt{(\sigma_b+\sigma_n)^2+4\tau^2}\\&=\{16/[\pi(1-n^4)d_2^3]\}\\&\times\sqrt{[M+Pd_2(1+n^2)/8]^2+T^2}\\&\approx 5.1T_e/[(1-n^4)d_2^3]\\\sigma_{max}&=\{16/[\pi(1-n^4)d_2^3]\}[M+Pd_2(1+n^2)/8]\\&+\sqrt{[M+Pd_2(1+n^2)/8]2+T^2}\\&\approx 10.2M_e/[(1-n^4)d_2^3]\end{aligned}$$

这时当量扭矩和当量弯矩分别为

$$\begin{aligned}T_e&=\sqrt{[M+Pd_2(1+n^2)/8]^2+T^2}\\M_e&=(1/2)[M+Pd_2(1+n^2)/8]\\&+\sqrt{[M+Pd_2(1+n^2)/8]^2+T^2}\end{aligned}$$

其中对于实心轴，$d_2=d$，$n=0$。当外力 P 为拉力时，τ_{max}、σ_{max} 分别为轴弯曲时受拉一侧的应力值；当 P 为压力时，τ_{max}、σ_{max} 分别为轴弯曲时受压一侧的应力值。

功率的传递

轴　转矩

下面分析作用于轴上的功率与转矩之间的关系。如图 3.18 所示，设轴在转矩 T(N·mm)的作用下，以角速度 ω(rad/s)旋转，其中，轴的直径为 d(mm)，旋转角度为 θ(rad)，圆周的切向力为 F(N)，则轴从点 a 转到点 b 所做的功 A(J)为：

$$\begin{aligned}A&=F\times\overset{\frown}{ab}\\&=F\frac{d}{2}\theta\\&=T\theta\ (\text{N}\cdot\text{mm})\\&=\frac{T\theta}{1000}\ (\text{J})\end{aligned}$$

若从点 a 到点 b 的时间为 t(s)，转速为 n(r/min)，则

$$\omega=\frac{\theta}{t}=\frac{2\pi n}{60}(\text{rad/s}),\ \theta=\frac{2\pi nt}{60}$$

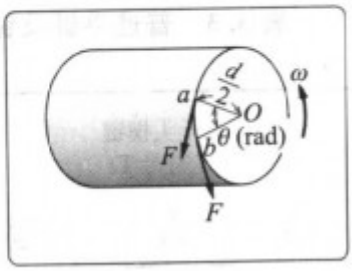


图 3.18 功率和转矩

轴上传递的功率 P(W)为：

$$P=\frac{A}{t}=\frac{T\theta}{1000t}$$

$$=T\frac{2\pi n}{1000\times 60}$$

$$\approx 1.047\times 10^{-4}Tn\ (\mathrm{W})$$

键

键用于联轴器、齿轮等与轴的连接。键的种类如图 3.19 所示，普通平键和键槽的形状及尺寸如表 3.3 所示。

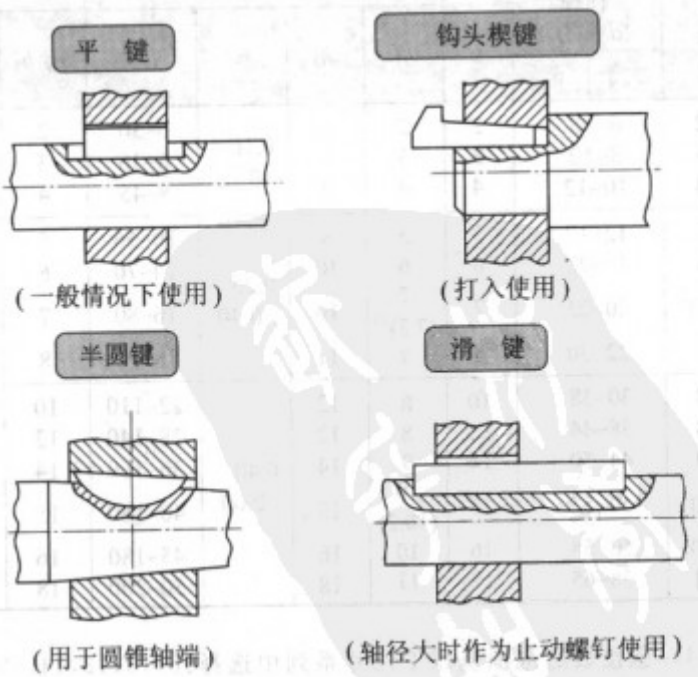
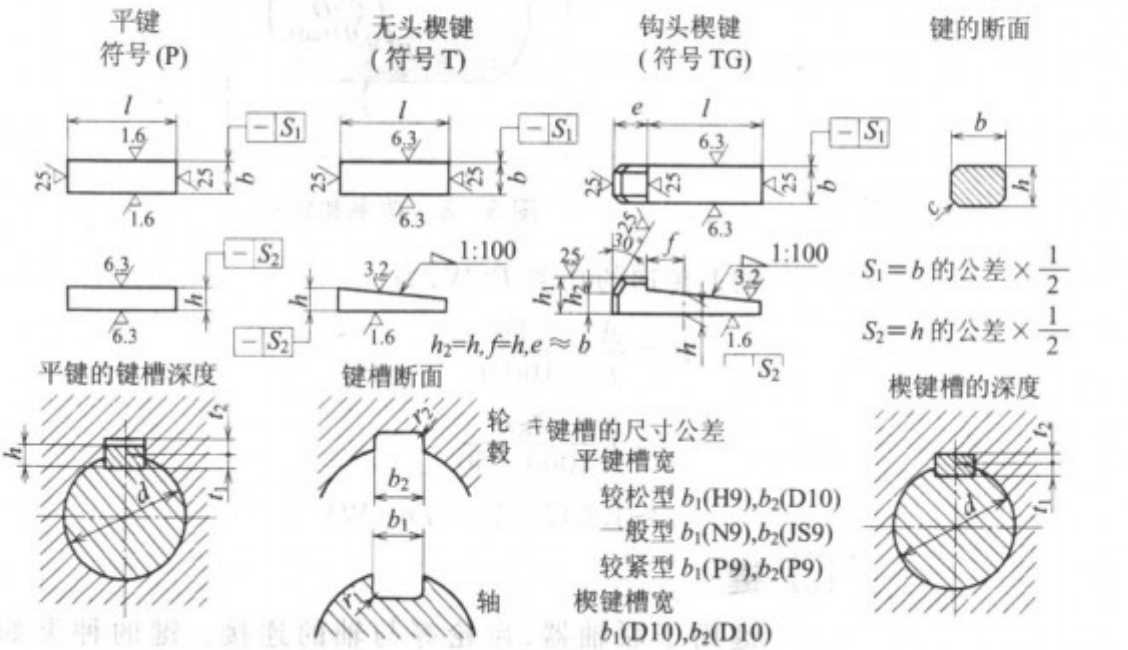


图 3.19 键的种类

表 3.3　普通平键及键槽的形状、尺寸

单位：mm



键的公称尺寸 $b\times h$	适用的轴径(d参考)		键的尺寸					键槽尺寸				
			b	h	h_1	c	l[1]	b_1, b_2	r_1, r_2	t_1	t_2	
	大于	至									平　键	楔　键
2×2	6	8	2	2	–	0.16 ~0.25	6~30	2	0.08 ~0.16	1.2	1.0	0.5
3×3	8	10	3	3	–		6~36	3		1.8	1.4	0.9
4×4	10	12	4	4	4		8~45	4		2.5	1.8	1.2
5×5	12	17	5	5	8	0.25 ~0.40	10~56	5	0.16 ~0.25	3.0	2.3	1.7
6×6	17	22	6	6	10		14~70	6		3.5	2.8	2.2
(7×7)[2]	20	25	7	7 (7.2)[3]	10		16~80	7		4.0	3.3	3.0
8×7	22	30	8	7	11		18~90	8		4.0	3.3	2.4
10×8	30	38	10	8	12	0.40 ~0.60	22~110	10	0.25 ~0.40	5.0	3.3	2.4
12×8	38	44	12	8	12		28~140	12		5.0	3.3	2.4
14×9	44	50	14	9	14		36~160	14		5.5	3.8	2.9
(15×10)	50	55	15	10 (10.2)	15		40~180	15		5.0	5.3	5.0
16×10	50	58	16	10	16		45~180	16		6.0	4.3	3.4
18×11	58	65	18	11	18		50~200	18		7.0	4.4	3.4

(JIS B 1301:1996)

注：1) l 值按表的范围从以下尺寸系列中选择：8，10，12，14，16，18，20，22，25，28，32，36，40，45，50，56，63，70，80，90，100，110，125，140，160，180，200，220，250，280。

2) 公称尺寸加括号的尽量不用。轴径大于 65mm 的未列出。

3) 尺寸 h 加括号的是钩头楔键的尺寸。

轴 承

轴承 用于旋转轴的支承，是使轴能够准确、平滑旋转的机械零件。轴上安装轴承的部分称为**轴颈**。

轴颈

向心轴承与推力轴承

向心轴承 承受径向载荷的轴承(见图 3.20)。

推力轴承 承受轴向载荷的轴承(见图 3.21)。

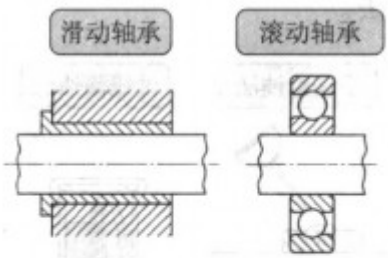


图 3.20 向心轴承

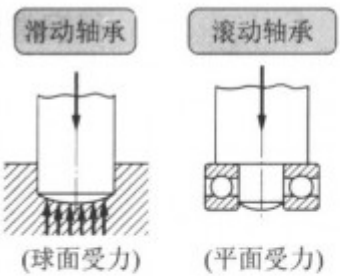


图 3.21 推力轴承

滑动轴承与滚动轴承

滑动轴承 轴承与轴颈之间为滑动接触的轴承称为滑动轴承，图 3.22 所示为滑动轴承中的向心轴承。若使铸铁制成的轴承座与轴颈直接接触，摩擦面将发生磨损，为避免这种现象，应在轴承接触面上安装**轴瓦**，轴瓦的材料一般为锡青铜、黄铜、青铜和铝合金等。此外，也用白合金、铅青铜轴承合金等质地较软的材料作为铸铁、青铜等材料的轴瓦里衬。

轴瓦

滑动向心轴承的内径与轴颈的直径差称为**轴承游隙**，轴承游隙对油膜的形成有很大影响。

轴承游隙

轴承游隙与轴颈的直径之比称为**轴承游隙比**，普通轴承的游隙比为 0.001 左右。如图 3.23 所示，若轴承的内径为 D，轴颈的直径为 d，则轴承游隙为 $D-d$，而轴承的游隙比为 $(D-d)/d$。

轴承游隙比

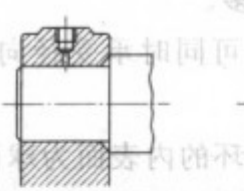


图 3.22 滑动轴承(向心轴承)

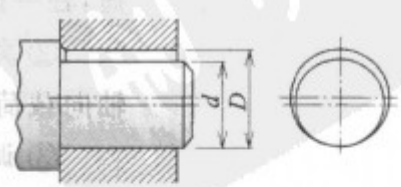


图 3.23 轴承游隙

滑动轴承的润滑方法 使用滑动轴承时，在轴承与轴

颈的间隙中必须加入润滑脂或润滑油进行润滑，图 3.24 所示为润滑方法的图例。

① 手动润滑方法：由人工使用注油器适时地进行手动加油的润滑方法。

② 油线滴油润滑方法：使用油杯通过线绳随时滴油的润滑方法。

③ 飞溅润滑方法：使油箱内的润滑油飞溅到轴承上进行润滑的方法。

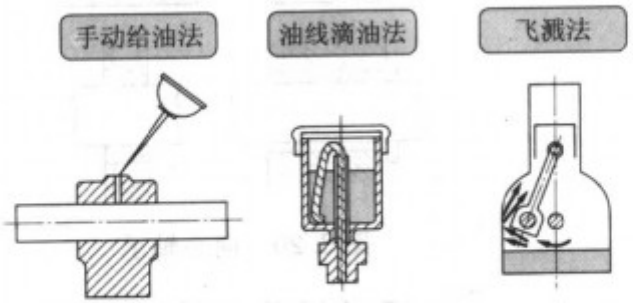


图 3.24　润滑方法

（引自塚田忠夫等主编的《新机械设计Ⅰ》（实教出版社））

滚动轴承　在轴承与轴颈之间加入滚珠或滚柱等滚动体，实现滚动接触的轴承叫滚动轴承，其种类如图 3.25 所示。



① 深沟球轴承　② 角接触球轴承　③ 调心球轴承　④ 圆锥滚子轴承　⑤ 滚针轴承

图 3.25　滚动轴承的种类

① 深沟球轴承：可同时承受径向载荷和较小的轴向载荷，在一般场合使用较多。

② 角接触球轴承：可同时承受径向载荷和一个方向的轴向载荷。

③ 调心球轴承：外环的内表面为球面，在转动中即使轴心稍有倾斜也能自动调整，从而使之正常转动。

④ 圆锥滚子轴承：可承受较大的径向载荷和轴向载荷。

⑤ 滚针轴承：使用多个较细小的滚针作为滚动体，可以减小轴承的外径尺寸。

滚动轴承的润滑方法 滚动轴承的润滑应该考虑滚动接触的滑动摩擦部分、保持架与滚动体（滚珠、滚子）之间的摩擦部分的润滑及轴承内部的防锈问题。润滑方法有如下几种。

① 润滑脂润滑：采用向轴承内注入润滑脂的方法进行润滑。

② 油浴润滑：将轴承的部分滚动体浸在润滑油中进行润滑。

③ 循环润滑：将使用过的润滑油过滤后循环供油的润滑方法。

④ 喷射润滑：用喷嘴向轴承内喷入压力润滑油的润滑方法。

双列组合圆锥滚子轴承

双列组合圆锥滚子轴承是在轴承的内环与外环之间将滚子排列成相互垂直的两列而构成结构紧凑的轴承，如图 3.26所示。这种轴承的滚动面为线接触，因此轴承产生的弹性变形极小，而且一个轴承可以同时承受径向载荷、轴向载荷及力矩载荷等各方向的载荷。因为这种轴承的结构紧凑，且刚度和旋转精度都很高，所以在工业机器人上广泛使用。ISO中已经规定了这种轴承的标准系列，但尚未列入JIS标准。



图 3.26 双列组合圆锥滚子轴承

例 题

设某轴所传递的功率为 20kW，转速为 100r/min，求该轴所受的转矩。

答 转矩 T 可以用下面的式子求得：

$$T=\frac{1000\times60}{2\pi n}P=\frac{1000\times60}{2\pi\times100}\times20=194\times10^{4}(\mathrm{N}\cdot\mathrm{mm})$$

题外话

齿侧间隙与预载荷

齿侧间隙(backlash)是为了使齿轮能够正常转动，在互相啮合的轮齿之间留有的间隙。对于机械的整体来说，各运动副间的运动间隙是不可缺少的，所以，这种间隙一直被认为是不可避免的不利因素。

为了解决间隙问题，在球轴承和滚珠丝杠上采用了美国艾克赛勒公司提出的加预载荷的工艺方法。实现这种工艺最简单的方法就是将轴承的外环沿圆周方向切分成两部分，在装配时施加一定的预压力，使滚动体与轴承的内、外环之间在无间隙的条件下能够平滑地运动。采用这种球轴承和滚珠丝杠可以使机床和机器人的定位精度得到大幅度提高。

5 直线导轨

要 点

在机器人中保证运动顺滑进行的连接机构叫关节。关节分为转动的和直动的，前一节是与转动关节有关的内容，在本节将要讲解的是直动关节。

解 释

直动关节

滚动导轨

直动关节是由直线运动机构和为其全程导向的直线导轨构成。导轨有滑动导轨、**滚动导轨**、静压导轨和磁悬浮导轨等，在机器人上大量应用的是滚动导轨。

直线滚动导轨根据所使用的滚动体和导轨形状可分为下面几种。

① 按导轨的形状划分：可分为圆轴形、平板形和轨道形。

② 按有无滚动体的循环划分：可分为循环式和非循环式。

③ 按滚动体划分：可分为滚珠、滚子和滚针。

上述的各种形式分别有各自的特点，所以选择滚动导轨的关键是根据具体情况选择适合使用目的的导轨。通常，安装滚珠的滚动导轨适用于轻、中载荷，且需要摩擦小的场合；安装滚子的滚动导轨刚性大，适用于大载荷场合。

图 3.27、图 3.28 和图 3.30 是三个典型示例。

图 3.27 是最典型的直线导轨。它是由长导轨和滑动体组成，在导轨和滑动体的对应面安装了滚子，为 90°X 形 4

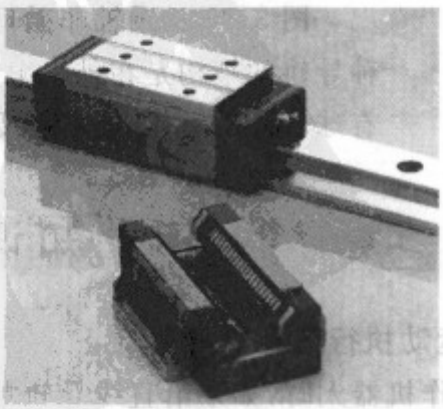


图 3.27 轨道循环式滚子导轨

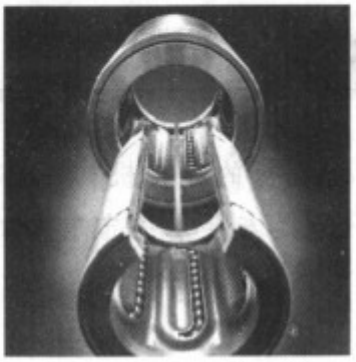


图 3.28　圆轴循环式滚珠导轨

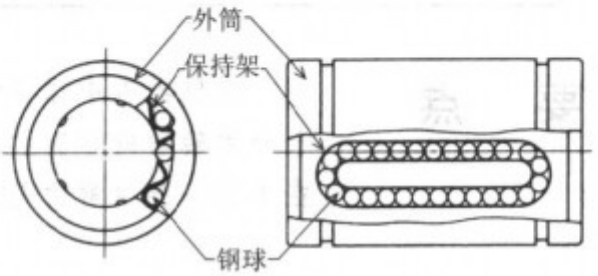


图 3.29　循环式导轨结构

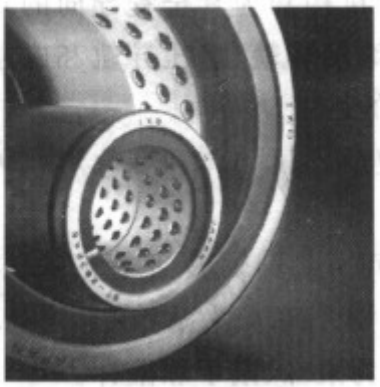


图 3.30　圆轴非循环式滚珠导轨

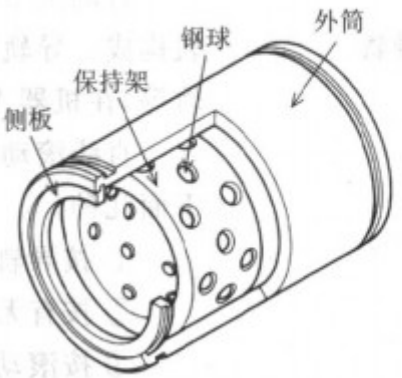


图 3.31　非循环式导轨结构

列分布。是4个方向均布载荷的规格，刚性大，适用于重载荷场合。

图3.28是圆轴循环式滚珠导轨。其结构如图3.29所示，保持架与外筒固定，滚珠在保持架循环槽内的循环极其顺滑。所以轴向运动可以不受限制，摩擦小，能够保证较高的进给精度。

图3.30是圆轴非循环式滚珠导轨。如图3.31所示，这种导轨的结构是在外筒上安装了保持架和滚珠。它同时具有球轴承的特点，能够承受直线运动和旋转运动。

相关知识

◆ 直线运动执行元件的应用

在设计制作机器人时，如果给直线导轨单独配置驱动装置，就不如使用直线运动执行元件简单。虽然后者的价格要高一些，但两者的外形尺寸几乎相

同。图 3.32 是作为机器人模块已经产品化的直线导轨的组合应用示例。

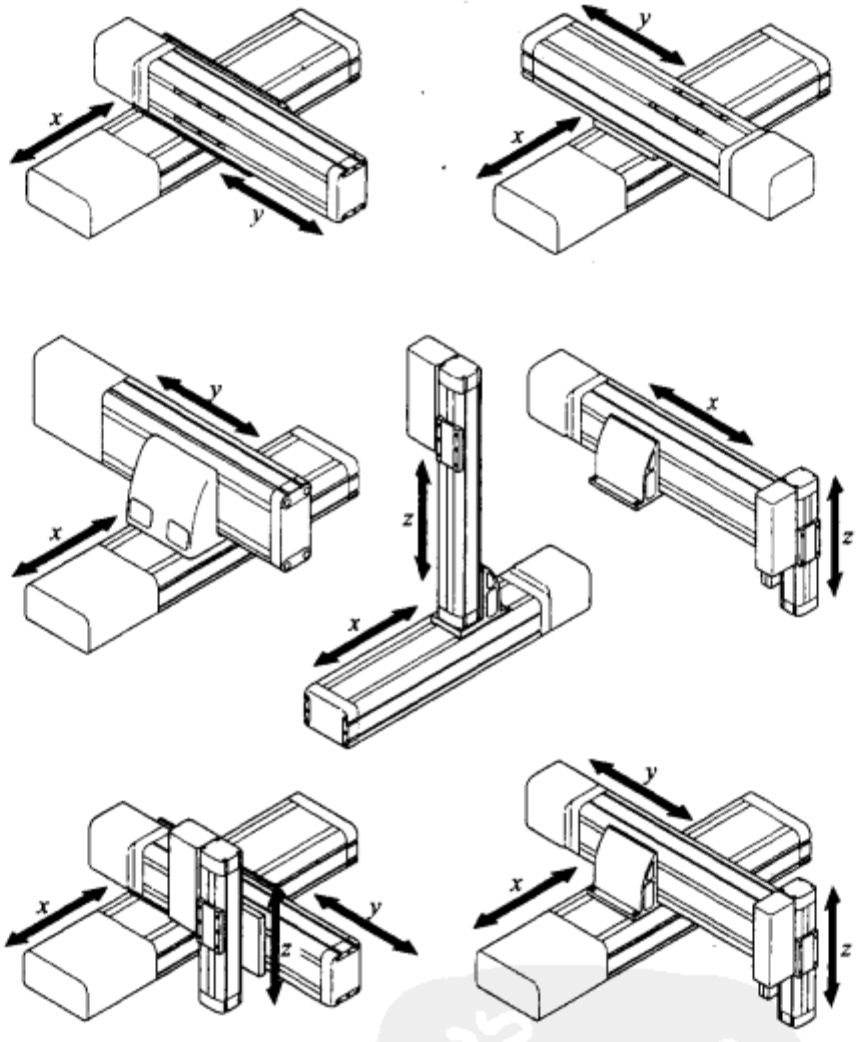


图 3.32 组合应用示例

6　制动器及其作用

要　点

制动器是将机械运动部分的能量变为热能释放，从而使运动的机械速度降低或者停止的装置，它大致可分为机械制动器和电气制动器两类。

在机器人机构中，需要使用制动器的情况如下：

① 特殊情况下的瞬间停止和需要采取安全措施。

② 停电时，防止运动部分下滑而破坏其他装置。

解　释

机械制动器

电磁制动器

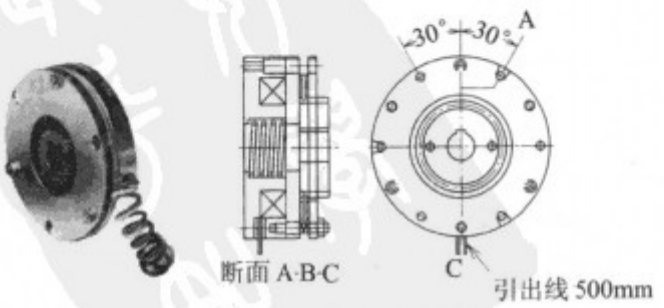
机械制动器有螺旋式自动加载制动器、盘式制动器、闸瓦式制动器和**电磁制动器**等几种，其中最典型的是电磁制动器。

在机器人的驱动系统中常使用伺服电机，伺服电机本身的特性决定了电磁制动器是不可缺少的部件。从原理上讲，这种制动器就是用弹簧力制动的盘形制动器，当有励磁电流通过线圈时制动器打开，这时制动器不起制动作用。而当电源断开线圈中无励磁电流时，在弹簧力的作用下处于制动状态的**常闭方式**。因此这种制动器被称为**无励磁动作型电磁制动器**。又因为这种制动器常用于安全制动场合，所以也称为**安全制动器**，如图 3.33 所示。

常闭方式

无励磁动作型电磁制动器

安全制动器



(a) 外　形　　(b) 结构断面

图 3.33　无励磁动作型电磁制动器

电气制动器(动力制动器)

电动机是将电能转换为旋转机械能的装置，反之，它也

具有将旋转机械能转变为电能的发电功能。换言之，伺服电机是一种能量转换装置，可将电能转换成机械能，同时也能够通过其反过程来达到制动的目的。但对于直流电机、同步电机和感应电机等各种不同类型的电机，必须分别采用适当的制动电路。

相关知识

◆ 使用制动器时的注意事项

在机器人搬运物体的搬运能力方面，搬运比是评价机器人性能的重要指标。

搬运比＝臂杆的质量/可搬运质量

当然搬运比的值越小越好，目前把搬运比能否超过 10 作为判断机器人性能优劣的基本条件之一。

在机器人上安装机械制动器会使质量有所增加，故应尽量避免。采用电气制动器，在不增加驱动系统质量的同时又具有制动功能，这是非常理想的情况，但电气制动器不能达到完全停止不动的制动效果，所以，在需要保持静止状态时必须采用机械制动器。

篇外话

内涨式制动器的维护问题

内涨式制动器如图 3.34 所示。这种制动器是主要用于汽车等的机械制动装置，它具有能够对连续负载实现平稳制动的特点，其优、缺点如下。

① 优点：与盘形制动器相比，有制造成本低、低速制动力大等特点。

② 缺点：由于散热问题而不易连续使用。此外，盘形制动器在维护时只需更换摩擦片的衬垫即可恢复原有的制动性能。而内涨式制动器不但会使制动轮磨损，还存在摩擦面曲率变化的问题。

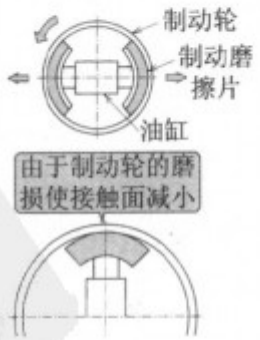


图 3.34 内涨式制动器的结构

7　齿轮原理及其分类

要　点

因为机器人需要完成各种必要的运动，所以，传递驱动装置能量（力和速度）的传动机构是非常重要的机构。齿轮副是其中最重要的传动机构之一。

解　释

齿轮

齿轮的分类

齿轮是在圆盘形毛坯上规则地加工出齿形而制成的零件。齿轮传动是将齿轮安装在轴上，通过两齿轮的轮齿直接接触来传递转矩的传动方式。按其传动形式的分类如图3.35所示。图3.36所示为齿轮各部分的名称。



图3.35　齿轮的种类

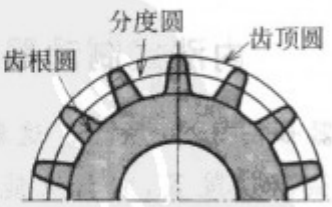


图3.36　齿轮各部分的名称

① 直齿轮：不存在轴向力，容易制造（见图3.37）。

② 斜齿轮：与直齿相比强度高，噪声小。运行时会产生轴向力，这一点在设计轴承时应该注意（见图3.38）。

③ 内齿轮：在内圆柱的表面上加工轮齿，可得到紧凑的结构（见图3.39）。

④ 齿条与齿轮：可将旋转运动变成直线运动（见图3.40）。

⑤ 直齿圆锥齿轮：直齿圆锥齿轮能够实现两相交轴之间的传动(见图 3.41)。

⑥ 螺旋齿圆锥齿轮：将圆锥齿轮的轮齿加工成螺旋齿，可使之强度高，传动平稳(见图 3.42)。

⑦ 螺旋齿轮：两斜齿轮的轴线交错安装的齿轮副(见图 3.43)。

⑧ 蜗杆与蜗轮：蜗杆(形状与螺杆相同)和蜗轮(相当于齿轮)的轴线垂直交叉安装，减速比大，但不能实现由输出轴到输入轴的逆向传动(见图 3.44)。



图 3.37 直齿轮



图 3.38 斜齿轮



图 3.39 内齿轮

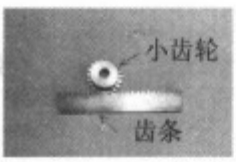


图 3.40 齿条与齿轮



图 3.41 直齿圆锥齿轮



图 3.42 螺旋齿圆锥齿轮



图 3.43 螺旋齿轮



图 3.44 蜗杆与蜗轮

齿轮原理

模数(m) 模数是表示轮齿大小的参数。即使是相同

直径的齿轮，若模数不同也不能互相啮合；模数较大的齿轮，齿形也比较大。JIS规定：模数为“分度圆上的齿距（周节）除以圆周率的值”，若用下列关系式表达就更容易理解。

模数(m)＝分度圆直径(d)/齿数(z)

中心距(a)　中心距是两互相啮合齿轮的节圆半径之和。实际上，由模数和齿数来计算中心距比较方便，其关系式为

中心距(a)＝模数(m)/2(齿数 z_1＋齿数 z_2)

此外，在模数和齿数不变时，可以采用变位齿轮来改变中心距。

减速比　齿轮传动的减速比等于被动齿轮的齿数与主动齿轮的齿数之比。如果固定中心距，提高减速比，则应减少模数。小齿轮的最少齿数是有界限（不同压力角的齿轮略有不同）的，这一点在选择时必须予以注意。

齿顶圆直径(d_k)：齿顶圆直径的关系式为

齿顶圆直径(d_k)＝分度圆直径(d)＋2×模数(m)

分度圆直径(d)：分度圆直径的关系式为

分度圆直径(d)＝模数(m)×齿数(z)

齿根圆直径：齿根圆直径的关系式为

齿根圆直径≤齿顶圆直径(d_k)－2×2.25×模数(m)。

相关知识

◆ 渐开线

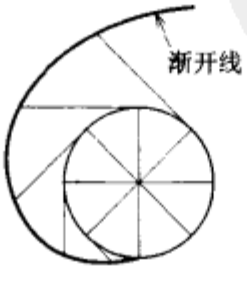


图 3.45　渐开线曲线

如图 3.45 所示，将绕到圆柱上的线绳拉直展开时，将线端的轨迹称为**渐开线曲线**。除了钟表上使用的小齿轮为摆线齿形以外，一般齿轮的齿形曲线均为渐开线。

8 齿轮机构

要 点

在设计机器人时，必须尽量降低质量，特别是驱动系统的质量增加将直接影响到可搬运质量的减轻，必须特别注意。虽然可以实现直接驱动方式，但采用高速伺服电机与减速器组合的形式也较多。因此对机器人来说，减速器是其中非常关键的部件。

解 释

速度 转速

力(或力矩) 放大机

减速器

所谓减速器就是使**速度(或转速)**降低的机械，也可认为是**力(或力矩)放大机**。

与减速器相连的电机的输出功率为转速与转矩之积。功率一定时，如果转速 n 降低，则输出转矩增加。其关系为

$$P=2\pi\times n\times T/60\times 1000$$

其中，P 为电机的输出功率(kW)；T 为转矩(N·m)；n 为转速(r/min)。

典型的减速机构

直齿圆柱齿轮减速机构 这种减速机构能够在减速的同时传递较大的力矩，在机器人上用得非常多。但这种减速机构不适用于大减速比的情况。

图 3.46 所示为在多关节机器人的回转工作台上使用的直齿圆柱齿轮减速机构。直齿圆柱齿轮传动没有轴向力，机构设计和齿轮的加工都比较容易，但存在齿侧间隙，

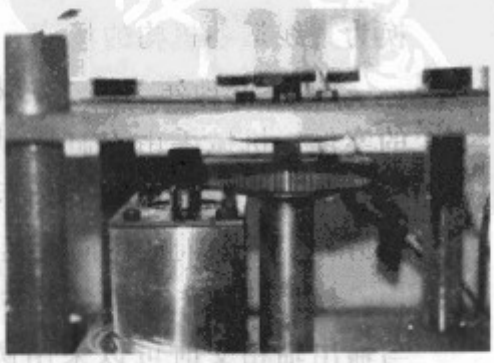


图 3.46 转 台

定位时要特别注意。图 3.47 是用于多关节机器人臂部驱动的直齿圆柱齿轮减速机构。

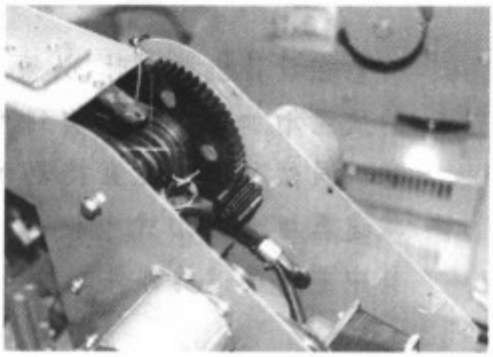


图 3.47　臂部的驱动机构

蜗杆蜗轮机构　图 3.48 所示为用于机器人臂部的蜗杆蜗轮机构。这种机构具有自锁功能，没有制动器也能保持位置不变。因输入轴与输出轴交错布置，所以只适用于这种形式臂部机构的驱动。图 3.49 所示为机器人的整体结构。

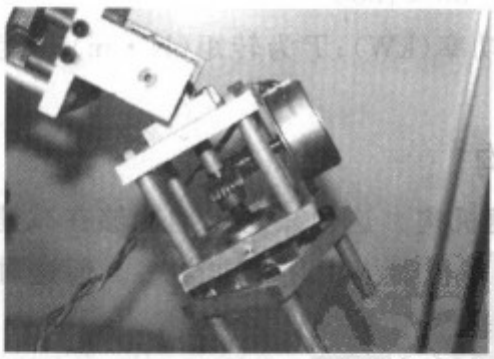


图 3.48　机器人臂部的蜗杆蜗轮机构

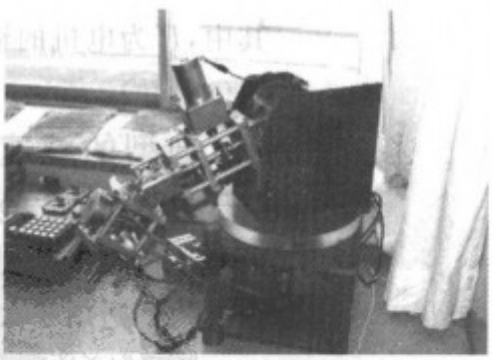


图 3.49　多关节机器人的整体结构

齿轮齿条直线运动机构　使用小齿轮与齿条可将旋转运动变为直线运动。它适用于需要将电机等的旋转运动转换为直线运动机构的场合。

图 3.50 所示为多关节机器人的手爪张开和抓紧机构的实例。机械手由汽缸驱动，汽缸的直线运动直接驱动机械手的一个爪向前或者向后运动，经过齿条与小齿轮来带动另一个爪向前或者向后运动。

使用圆锥齿轮的多关节机器人的内部构造　当输入轴与输出轴相交时可以采用圆锥齿轮传动。图 3.51 所示为多关节机器人的关节部分使用圆锥齿轮传动的例子。为了

布置电机方便，一般都使旋转轴垂直相交。

图 3.52 也是同样的例子，在这个机构中不但使两轴为垂直相交布置，而且机构自身的角度也可适当改变。

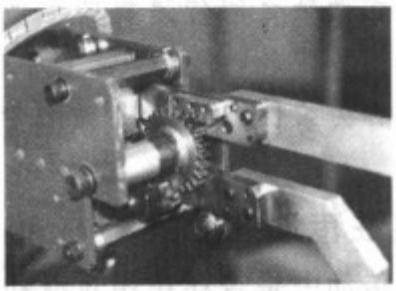


图 3.50 多关节机器人的手部

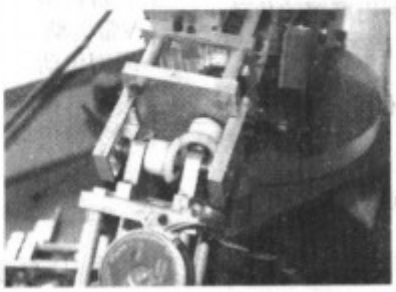


图 3.51 机械手的关节部分

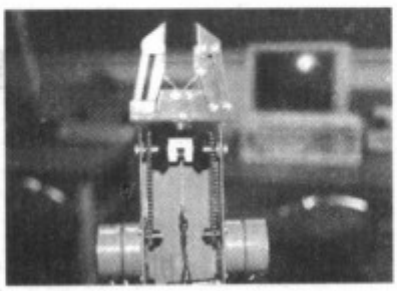


图 3.52 机械手的旋转部分

篇外话

谐波减速器

如图 3.53 所示，谐波减速器由固定的内齿圈(A)、波发生器(B)、柔性外齿圈(C)(可弹性变形)三个基本零件构成，其特点有如下几点：

① 减速比大。

② 齿侧间隙小。

③ 不存在质量偏心。

④ 结构紧凑，质量轻。

目前，大多数机器人都采用了这种谐波减速器。

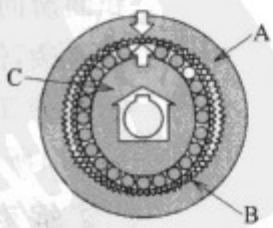


图 3.53 谐波减速器结构

9　柔性传动机构

要　点

要在两轴之间传递旋转运动和力矩，可以采用在两轴上分别安装带轮，并在带轮上环绕带的传动方法。这种传动方法称为柔性传动，特别适合传递轴间距较大的运动。

解　释

柔性传动的分类

按传动中是否存在相对滑动现象，可将柔性传动大致分为如图 3.54 所示的几种类型。

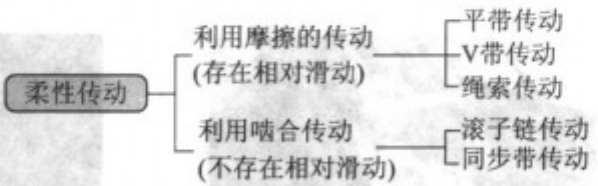


图 3.54　柔性传动的分类

定位精度

机器人对**定位精度**要求很高，传动过程中存在相对滑动是其致命的缺陷，因此机器人中不能采用由摩擦力实现传动的机构。实际应用中，几乎不使用图 3.54 中所列的前三种存在相对滑动的传动方式。但在机器人竞赛中的搬运机器人上，为了简化结构，降低费用，并且利于自己制作，有的也采用了绳索传动方式，但在设计中必须很好地解决相对滑动问题。

滚子链
同步带

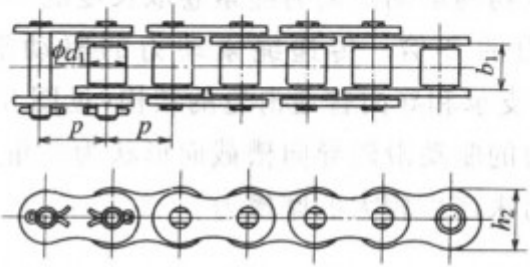
当两轴间距离较大、不能使用齿轮传动时，可以采用**滚子链**或**同步带**传动。在采用滚子链传动时，必须考虑松弛和润滑问题。而在采用同步带传动时，虽然带轮的制造比较复杂，但完全采用了单元化结构，不需要带的张紧和注油等维护工作，因此，最近在机器人上应用得越来越多。表 3.4所列为滚子链的种类，表 3.5 所列为同步带的种类。

绳索传动

起重机

绳索传动常用于**起重机**（见图 3.55）、电梯、索道等设备。绳索与齿轮和链传动相比价格便宜，适用于在较长的区间内传递力矩。

表 3.4 滚子链的种类

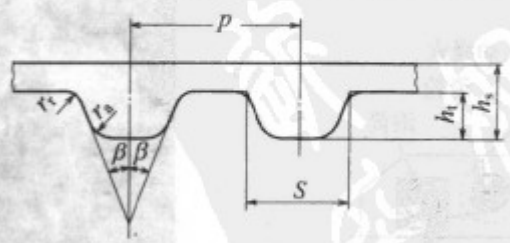


需要传递较大力矩时，将其排成几列，并用长销穿过，叫做多列滚子链

尺寸规格	节 距 p/mm（标准值）	滚子外径 d_1/mm（最大）	滚子链节槽宽 b_1/mm（最小）	滚子链节板高度 h_2/mm（最大）	断裂载荷/kN（最小）
25	6.35	3.3	3.1	6.1	3.6
35	9.525	5.08	4.68	9.1	8.7
41	12.7	7.77	6.25	10	7.4
40	12.7	7.92	7.85	12.1	15.2
50	15.875	10.16	9.4	15.1	24
60	19.05	11.91	12.57	18.1	34.2
80	25.4	15.88	15.75	24.2	61.2
100	31.75	19.05	18.9	30.2	95.4
120	38.1	22.23	25.22	36.2	137.1
140	44.45	25.4	25.22	42.3	185.9
160	50.8	28.58	31.55	48.3	244.6
180	57.15	35.71	35.48	54.4	308.2
200	63.5	39.68	37.85	60.4	381.7
240	76.2	47.63	47.35	72.4	550.4

(JIS B 1801:1997)

表 3.5 同步带的种类



符 号	种 类				
	XL	L	H	XH	XXH
P/mm	5.080	9.525	12.700	22.225	31.750
$2b$/(°)	50	40	40	40	40
S/mm	2.57	4.65	6.12	12.57	19.05
h_t/mm	1.27	1.91	2.29	6.35	9.53
h_s/mm	2.3	3.6	4.3	11.2	15.7
r_r/mm	0.38	0.51	1.02	1.57	2.29
r_a/mm	0.38	0.51	1.02	1.19	1.52

注：p 的数值是基本尺寸。 (JIS K 6372:1995)

起重机利用滚筒卷取绳索，通过滑轮1传动，滑轮2的作用是使重物的运动距离为绳索卷取长度的一半，而提升力为绳索拉力的2倍。传递绳索动力的驱动滑轮结构（见图3.56）与支承和导向普通滑轮的结构（见图3.57）不同，传递绳索动力的驱动滑轮导向槽截面形状为三角形，它是利用内侧夹紧力来产生较大的摩擦力。

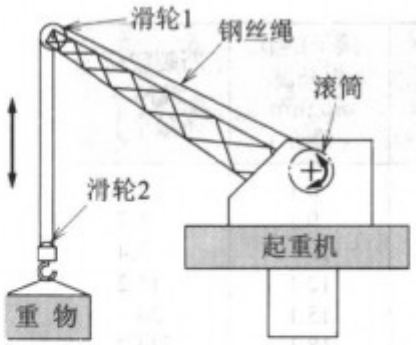


图3.55　起重机

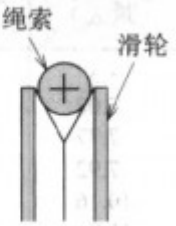


图3.56　驱动滑轮

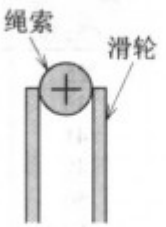


图3.57　普通滑轮

多关节机器人

图3.58所示为应用绳索传动方式实现**多关节机器人**的手爪张开与抓紧动作的机构。为了减轻机器人臂部前端的质量，将电机等驱动部分设计在本体的同一侧。而在臂杆中的长距离驱动，则采用钢丝绳来实现，图3.59所示为其驱动部分。

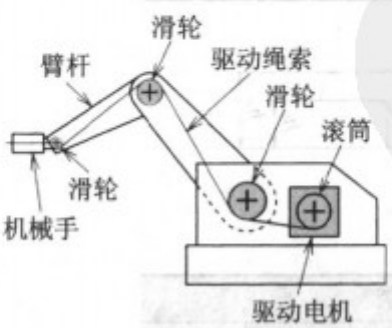


图3.58　采用绳索传动的机械手的驱动机构

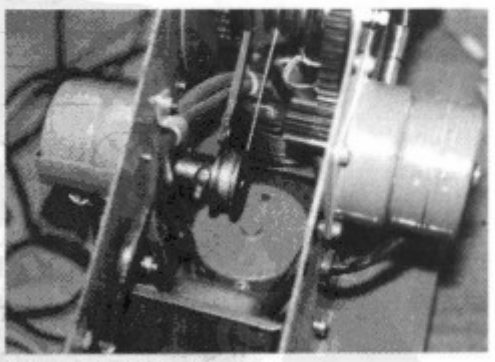


图3.59　柔性传动的驱动部分

滚子链（臂杆的内部结构）

滚子链

滚子链与齿轮相比主要用于低速、大转矩的传动，可以实现与同步带相同的同步运转。因为采用金属结构，所以使用寿命较长。适用于多关节机器人等，希望将驱动系统

尽可能安装在本体上的传动机构。它与同步带相比价格较便宜，可布置在较小的空间内，但在长距离传动时会产生松弛现象，必须采用**张紧机构**。

张紧机构

图 3.60 所示为链传动机构在多关节机器人上的应用实例。

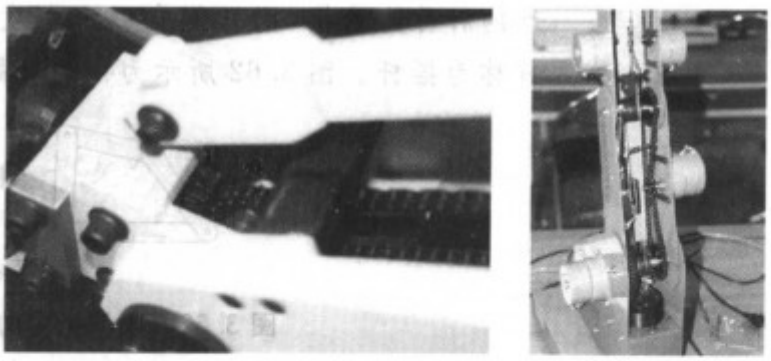


图 3.60 链传动机构在多关节机器人中的应用实例

同步带

同步带传动

同步带传动机构是在带的内侧和带轮外圆周上加工出与齿轮相似的齿形，完全由齿形的啮合来传动，能够实现同步运转。与 **V 带轮**传动机构相比，不需要带的张紧机构；与齿轮传动相比，具有噪声小、不需要润滑，适用于轴间距较大的轻载传动。同步带的材质可以采用橡胶等各种材料。但同步带传动机构的**造价**比 V 带轮传动机构高出 15～20 倍。图 3.61 所示为多关节机器人的驱动部分使用同步带传动机构的实例。

V 带轮

造价

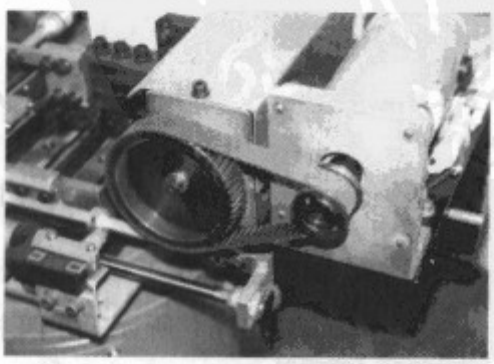


图 3.61 同步带传动机构实例

10　连杆机构的相关技术

要　点

用销轴等零件将细长的杆件连接组成的机构称为连杆机构。杆与杆之间可构成转动副或滑动副，其中，做旋转运动的杆称为**曲柄**，而只能在一定角度范围内做往复摆动的杆称为摇杆。图 3.62 所示为由**转动副**构成的连杆机构。

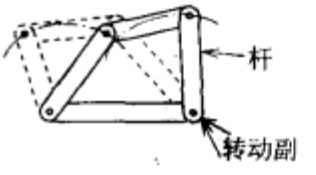


图 3.62　连杆机构的例子

解　释

连杆机构的工作原理

传递运动的机构有许多种，在这些机构中，带动其他部分运动的零件叫做**主动件**(driver)，最后实现必要运动的零件叫做**从动件**(follower)。根据主动件与从动件之间的关系可以将传动方式分为**直接传动**与**间接传动**两类。

主动件
从动件
直接传动
间接传动

直接传动

主动件与从动件之间通过直接接触来传递运动的机构称为直接传动机构。如图 3.63 所示，主动件凸轮 A 旋转，推动从动件阀杆 B 做往复运动，这就是一种直接传动机构。齿轮、摩擦轮、凸轮等传动机构均为直接传动机构。



图 3.63　直接传动的例子

间接传动

四连杆机构

如图 3.64 所示，由四根杆件组成的机构称为**四连杆机构**。

主动件 A 与从动件 C 分离，主动件 A 的运动先传给杆件 B，再由杆件 B 将运动传给从动件 C，这样的运动形式称

为间接传动。

连杆(中间件)

运动传递的中介杆件 B 称为**连杆(中间件)**，固连于静止坐标系的固定件称为**机架**。

机架

中间件不单指连杆这样的刚性构件，也包括带等柔性件和压力油之类的流体等。

四连杆机构

杆件按使用方法可分为曲柄和摇杆。机架和连接件暂且不论，根据主动件和从动件的使用方法，可将四连杆机构按曲柄和摇杆的组合形式分为以下三种基本机构。

曲柄摇杆机构　如图 3.65 所示，如果杆 A 为机架，杆 C 为连杆，那么，短杆 D 就是可回转的曲柄，长杆 B 则是可以进行往复摆动的摇杆。杆 B 和杆 D 都可以作为主动件或者从动件使用。

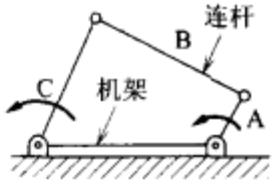


图 3.64　四连杆机构

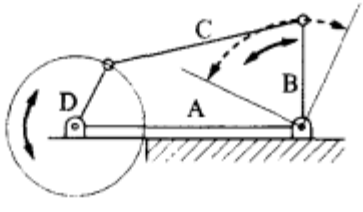


图 3.65　曲柄摇杆机构

双曲柄机构　如图 3.66 所示，若将短杆 A 固定，C 作为连杆，则杆 B 和杆 D 均可作为曲柄。这时，如果主动件为匀速回转，则从动件为非匀速回转。

双摇杆机构　如图 3.67 所示，若以杆 A 为机架，C 作为连杆，那么 B、D 两杆均可作为摆杆。它主要应用于铲土机、水平牵引式起重机等，可以说是一种最典型的连杆机构。

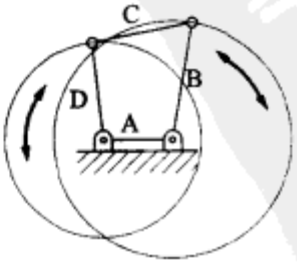


图 3.66　双曲柄机构

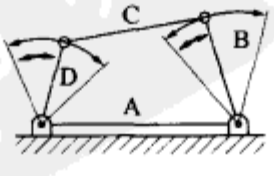


图 3.67　双摇杆机构

其他类型的连杆机构及应用实例

滑块机构

曲柄滑块机构　曲柄与**滑块机构**组合起来能够将旋转运动变为直线运动(或将直线运动变为旋转运动)。一般驱动机器人臂部运动的伺服装置都是电动机,所以,常需将旋转运动变成直线运动。图3.68所示为一**曲柄滑块机构**。

曲柄滑块机构

连杆机构

曲拐　曲拐机构是**连杆机构**的一种应用,很早以前就开始在曲柄夹紧机构和冲压机构上使用。这种机构的往复运动范围大,并能够产生较大的压力。图3.69所示为曲拐机构在机械手夹紧部分的应用。

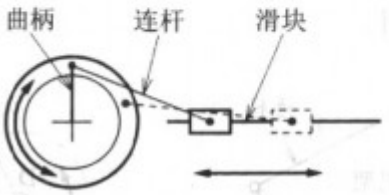


图3.68　曲柄滑块机构

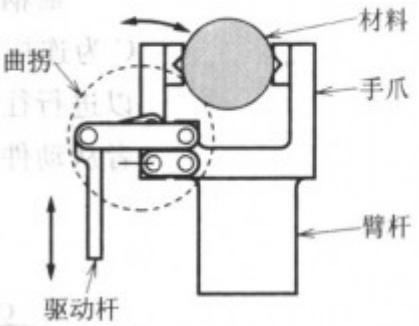


图3.69　曲拐机构(机械手)

平行四连杆机构

平行四连杆机构　在多关节机器人臂部使用**平行四连杆机构**是为了始终保持臂部的方向不变,如图3.70所示。

图3.71所示为多关节机器人臂部使用的平行四连杆机构,这样的机构可使机器人的手部始终保持在水平方向上。

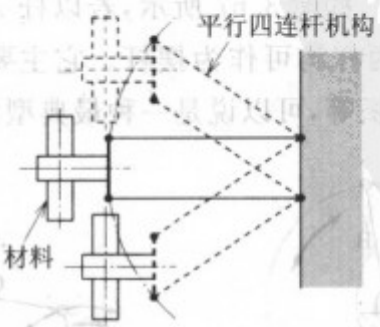


图3.70　平行四连杆机构

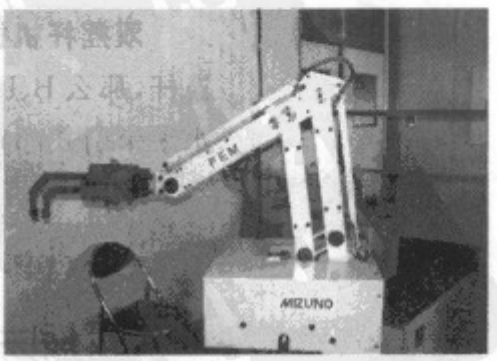


图3.71　机械手的四连杆机构

图3.72和图3.73所示为多关节机器人机械手使用的平行曲柄机构,能够保证手爪的前端做平行运动。

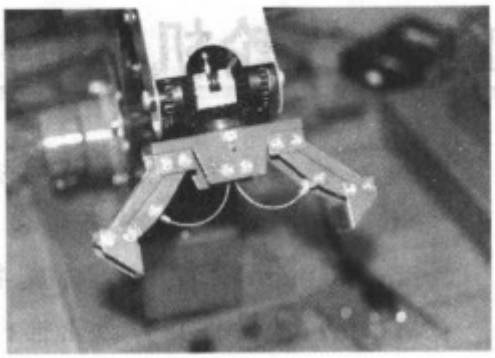


图 3.72 机械手的张开状态

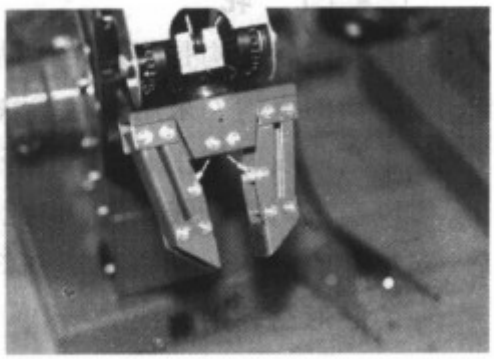


图 3.73 机械手的夹紧状态

11　凸轮机构的相关技术

要　点

根据从动件所要实现的运动而将主动件设计成特殊形状，并通过直接接触来传递运动的机构称为凸轮机构(cam mechanism)。其中，制成特殊形状的主动件称为凸轮(cam)，从动件称为凸轮推杆(cam follower)。

解　释

凸　轮

曲柄滑块机构

凸轮机构是将旋转运动转变为较短距离的做直线往复运动的机构。采用**曲柄滑块机构**所获得的直线运动速度呈正弦曲线规律变化，为不等速直线运动。采用凸轮机构可以实现匀速直线运动，也能够获得匀速运动与不等速运动组合的复杂运动规律。图 3.74 所示为实现直线匀速运动的**心形凸轮**的曲线。

心形凸轮

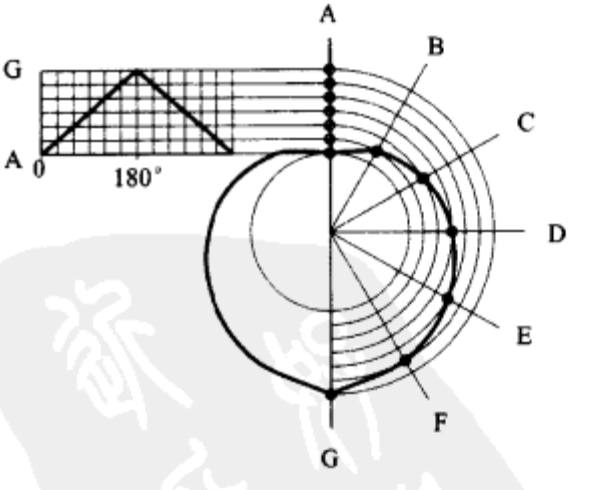


图 3.74　心形凸轮的曲线

凸轮的种类

如图 3.75 所示，凸轮可按接触部位的运动形式分为平面运动的平面凸轮(plane cam)和空间运动的空间凸轮(solid cam 或 spatial cam)。

① 盘形凸轮：在平面凸轮中，应用最广的是具有特殊轮廓形状的旋转盘形凸轮(见图 3.76)。

② 移动凸轮：做往复直线运动的凸轮(见图 3.77)。



图 3.75　凸轮的分类

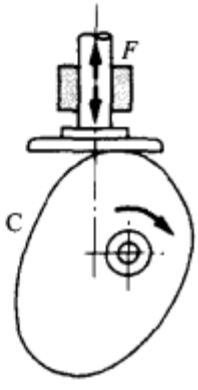


图 3.76　旋转盘形凸轮

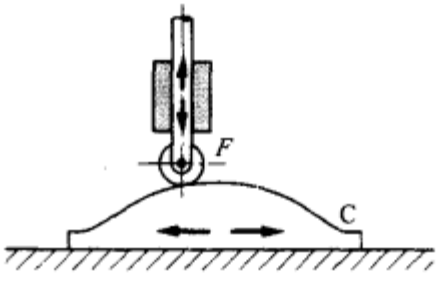


图 3.77　移动凸轮

③ 框形封闭凸轮：将凸轮整体装入从动件的框形结构中，形成几何封闭形状，这种能够精确传递运动的凸轮称为确动凸轮，框形封闭凸轮是其中的一种（见图 3.78）。

④ 逆向凸轮：从动件制成特殊形状的凸轮机构（见图 3.79）。

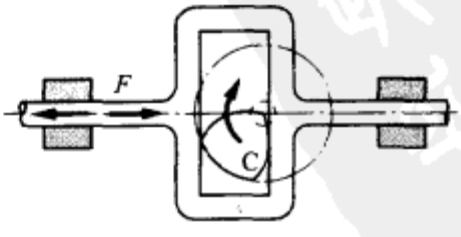


图 3.78　框形封闭凸轮

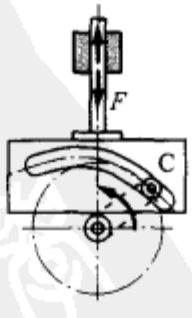


图 3.79　逆向凸轮

⑤ 旋转体凸轮：在圆柱、圆锥或球面等回转体的表面上加工出具有特殊曲线规律的沟槽，将从动件嵌入沟槽内，通过主动件的旋转来传递运动的凸轮机构称为旋转体凸轮机构，其中的主动件称为旋转体凸轮（见图 3.80）。

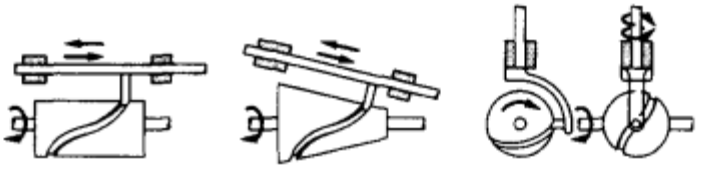


图 3.80　旋转体凸轮

⑥ 端面凸轮：这是通过在轴的端面上加工出特殊轮廓而制成的凸轮（见图 3.81）。

⑦ 斜盘凸轮：可使从动件实现简谐振动的凸轮（见图 3.82）。



图 3.81　端面凸轮

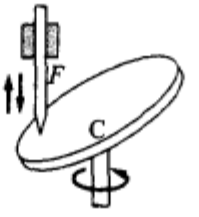


图 3.82　斜盘凸轮

凸轮机构在机器人上的应用

凸轮设计比较简单，只要设计出凸轮的曲线就基本完成了，但加工凸轮曲面比较复杂。因此，近年来在各种机械中使用电气装置、液压和气动装置或选择其他的机构来实现复杂运动的比较多，有尽量不使用凸轮机构的趋势，在机器人的设计中也是如此。

心形凸轮
匀速直线运动

图 3.83 所示为机械手上使用**心形凸轮**（**匀速直线运动**）的应用实例。

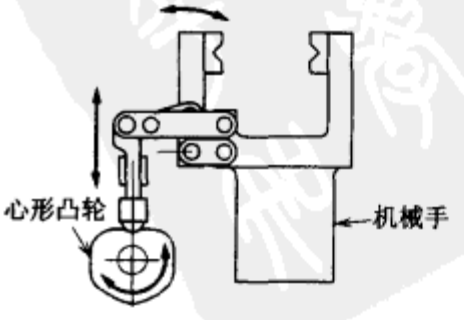


图 3.83　用心形凸轮驱动机械手

篇外话

使凸轮机构能够平滑传动的滚子

在各种工程机械机构中，用伺服电机驱动已逐渐成为主流。但在发动机等运动规律固定的高速驱动机构中，仍然要采用凸轮机构。

以前凸轮表面的接触采用滑动副，这就要使用润滑油对其进行润滑。由于凸轮接触面磨损等原因，还需要对凸轮机构定期进行维护。若在从动件与凸轮接触的部位安装上滚子，形成滚动摩擦结构就可以解决这种磨损问题(见图 3.84)。

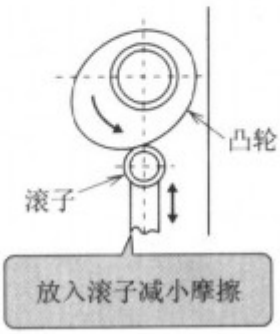


图 3.84 凸轮与滚子

第 4 章

传感器技术

● 责任编委
小岛昭雄
● 执　　笔
增田彦四郎(1~4)
小堀　隆(5~8)
小岛昭雄(9~14)

传感器技术是机电一体化领域中的重要技术之一。要进行某种控制就离不开传感器。

即使有了好的传感器，如果不会很好地运用，还是达不到预期的控制效果。未来的机电一体化产品，要求能够完成高精度和高速度的控制。为了实现这一目标，高性能的传感器及高超的传感器应用技术必不可少。

现在，随着科技的发展，要求开发出能够检测各种物理量的传感器，已经产品化的有很多。

在本章中，将根据在机电一体化领域检测项目的需求，对传感器进行分类，并尽可能通过具体示例加以说明。

1　力传感器

要　点

力传感器(force sensor)是一种能够检测拉力、牵引力、质量、压力、扭矩、材料内部应力和应变等力学量的传感器。

在力传感器中，目前有金属应变片、测力计、半导体压力传感器等多种类型。

解　释

金属应变片

应变

金属应变片

金属受到拉伸作用时，在长度方向发生伸长变形的同时会在径向发生收缩变形。金属的伸长量与原来长度之比称为**应变**。利用金属应变量与其电阻变化量成正比的原理制成的器件称为**金属应变片**(strain gauge)。普通金属应变片如图4.1所示，是在用苯酚和环氧树脂等绝缘材料浸泡过的玻璃基板上，粘贴直径为0.025mm左右的金属丝或金属箔制成的。

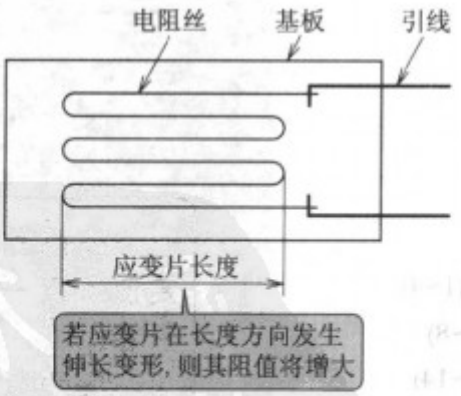


图4.1　电阻丝式金属应变片

惠斯通电桥电路

金属应变片是采用**惠斯通电桥**(Wheatstone bridge)**电路**，是将应力和拉力等力学量转换成电量，再将输出的微弱电压信号放大后进行检测的器件，参见图4.2。

在图4.2所示的电路中，假设$R_1=R_2=R_3=R_4$，当惠斯通电桥处于平衡状态时，电路的输出电压$e=0$。但是，当有一个金属应变片受力产生应变时，其阻值变为$R_1+\Delta R_1$，则输出电压e可由下式得出：

$$e=\frac{E}{4}\times\frac{\Delta R_1}{R_2}$$

假设一个金属应变片产生的应变为 ε_1，则上式将变为

$$e=\frac{E}{4}K\varepsilon_1$$

应变系数

式中，K 称为**应变系数**(gauge factor)，可表示金属应变片的电阻应变灵敏度。

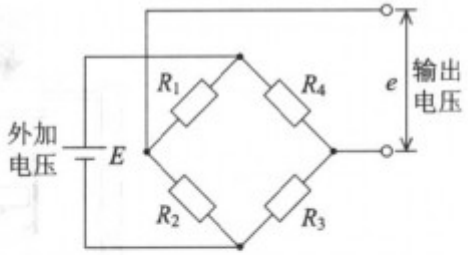


图 4.2 惠斯通电桥

利用惠斯通电桥构成力学量传感器时，可以采用电桥的一边为一个金属应变片、其他为固定电阻的方法，也可以采用在电桥上用 2 片或 4 片金属应变片组成的桥路结构，以此提高传感器的测量精度(见图 4.3)。采用 2 片金属应变片组成检测电路时，由于有 2 片金属应变片产生应变，因此可以得到单片应变片电路的 2 倍输出电压。采用 4 片金属应变片组成检测电路时，则可以得到单片应变片电路的 4 倍输出电压。此外，有的检测电路还采用具有温度补偿功能的金属应变片替换固定电阻，以达到提高电路测量精度的目的。

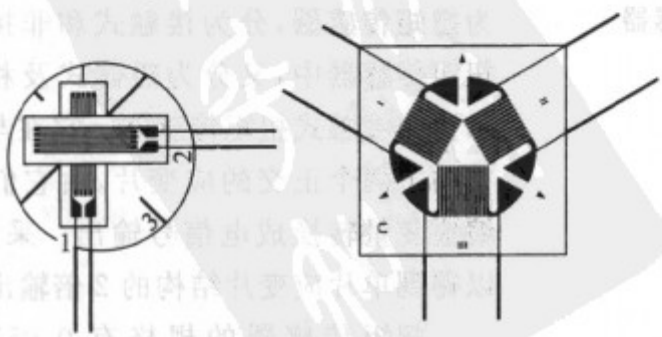


图 4.3 组合式应变片

普通金属应变片的阻值通常为 120Ω，当需要检测微弱应变时，可采用 10kΩ 的金属应变片。

测力计

测力计

用于测量拉力、牵引力、质量等力学物理量的专用传感器称为**测力计**(load cell)。其中，有的测力计采用粘贴多个金属应变片的结构，也有的采用半导体应变片作为转换元件，其结构如图 4.4 所示，它是在压力和拉力的检测部分贴有 4～8 个应变片。

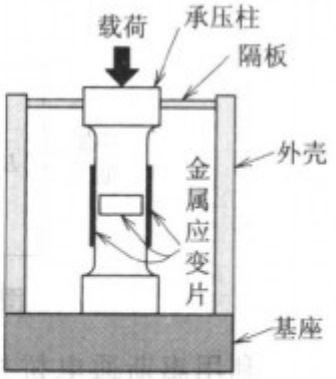


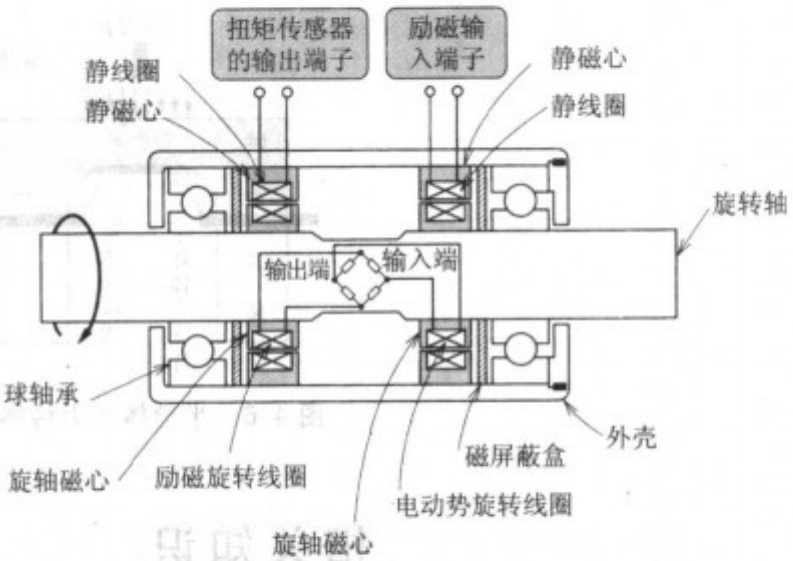
图 4.4　测力计的结构(压缩型)

在选择测力计时，可根据被测载荷的类型选择不同的测力计。其中，不仅有能测量拉力或测量压力的测力计，还有能同时检测拉力与压力的测力计。这些测力计的测量范围为 50mN～5MN，有多种规格。在选型时不要采用满容量使用，应考虑到冲击等因素而留有一定的余量。而且，还应综合考虑是否有冲击载荷、测量精度要求、支撑点的个数、使用环境温度等诸多因素，这一点是非常重要的。

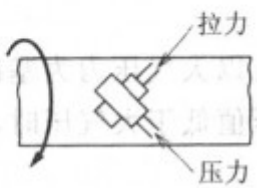
扭矩传感器

通过轴的扭转变形检测施加在物体上扭矩的测力计称为**扭矩传感器**，分为接触式和非接触式两类。在非接触式扭矩传感器中，又分为磁偏式及相位差式两种。图 4.5 所示为非接触式扭矩传感器。它在与轴线成 45°角的方向上，粘贴了两个正交的应变片，由它们将轴上产生的拉伸或压缩应变量转换成电信号输出。采用这种结构的传感器，可以得到单片应变片结构的 2 倍输出电压。

扭矩传感器的规格有 0.05N·m～50kN·m 多种型号。



(a) 结 构



(b) 因扭转在应变片上产生的力

图 4.5 非接触式扭矩传感器

半导体压力传感器

压阻效应

半导体压力传感器

在半导体晶体受到一个外力作用时，因半导体的**压阻效应**，其内部电阻将会发生很大的变化。利用半导体的这种特性制成检测压力的传感器称为**半导体压力传感器**(semiconductor pressure sensor)。

半导体压力传感器的结构如图 4.6 所示。在制造时，先将硅单晶基板的中央部分腐蚀成薄膜状的硅杯(diaphragm)，再用 IC 的扩散工艺制成由 4 个半导体应变片构成的惠斯通电桥，以此构成检测压力的传感器。

被测对象为空气、CO_2、He、Ne、Ar 和硅酮油等物质时，可以采用硅杯直接承压的测量方式；被测对象为水、海水、氟利昂、汽油、SO_2 等物质时，可以将硅杯通过玻璃贴在不锈钢的背面构成保护罩，通过保护罩承压。

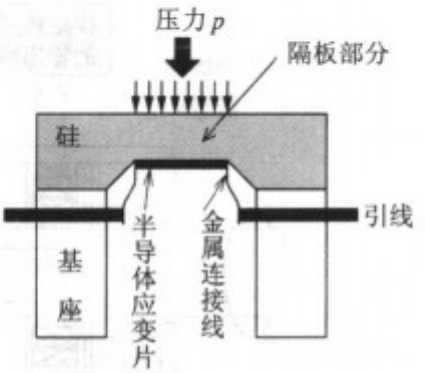


图 4.6　半导体压力传感器结构

相关知识

◆压　力

压力的表示方法有以大气压力为基准的表压及以真空为基准的绝对压两种。当被测压力的表压值低于大气压时，采用负压表示。

篇外话

压阻效应

晶体受到一个外部压力时，晶体内部会产生应变，这时其能带结构将发生改变，载流子(空穴或电子)的运动状态也将随之发生变化，由此引起该晶体的阻抗发生变化，这种现象称为压阻效应(piezo resistance effect)。

2 位移传感器

要 点

位移传感器(displacement sensor)是一种用于检测物体位置(长度、距离)及转动角度等物理量的传感器。

在常用的位移传感器中,有可变电位器、差动变压器、光电角度传感器、半导体角度传感器等多种类型。

解 释

可变电位器

可变电位器

电阻体

滑块

图 4.7 所示为一个圆形**可变电位器**的示意。在图 4.7 中,当转动滑块沿圆周状的电阻材料滑动时,输出电阻与滑块在电阻材料间的转动角度成正比。给**电阻体**施加一个固定的电压时,由**滑块**位置分压的输出电压,可由电阻材料的总电阻与滑块至固定端的电阻之比求得

$$E_{OUT}=E_{IN}\times\frac{R_O}{R_A}$$

式中,E_{OUT}为输出电压(V);E_{IN}为外加固定电压(V);R_A为材料的总电阻(Ω);R_O为固定端至滑块间的电阻(Ω)。

假设可变电位器的最大转动角度为θ_f,滑块的当前角度(位移量)为θ,则输出电压E_{OUT}可由下式求出:

$$E_{OUT}=E_{IN}\times\frac{\theta}{\theta_f}(0\leqslant\theta\leqslant\theta_f)$$

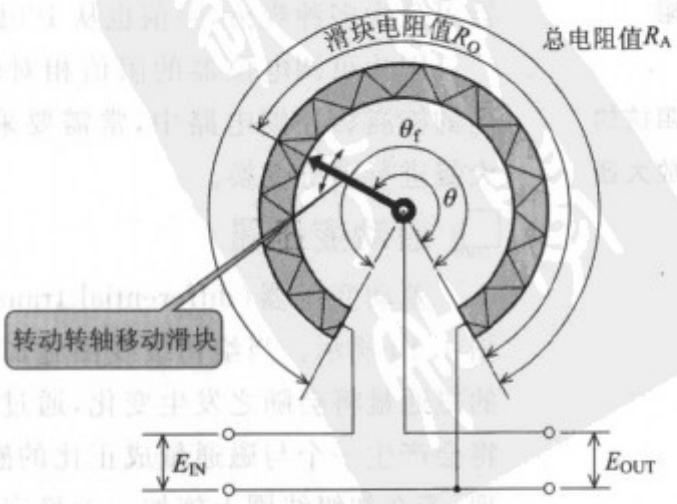


图 4.7 圆形可变电位器

线绕型

若可变电位器采用如图 4.8 所示的**线绕型**结构，则其分辨率将会呈离散式变化。

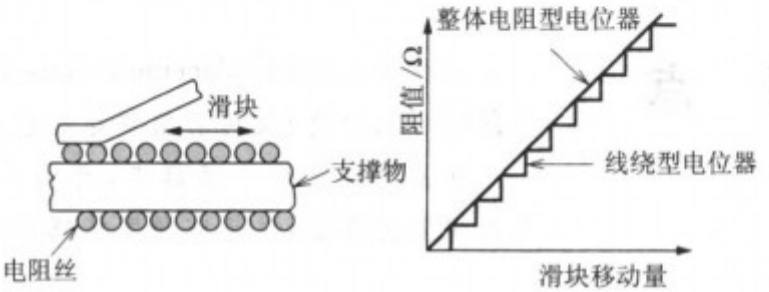


图 4.8　线绕型电位器的分辨率

多圈型

按结构的不同，可变电位器可分为单圈型(120°、340°)及如图 4.9 所示的**多圈型**(1800°、3600°)两种。

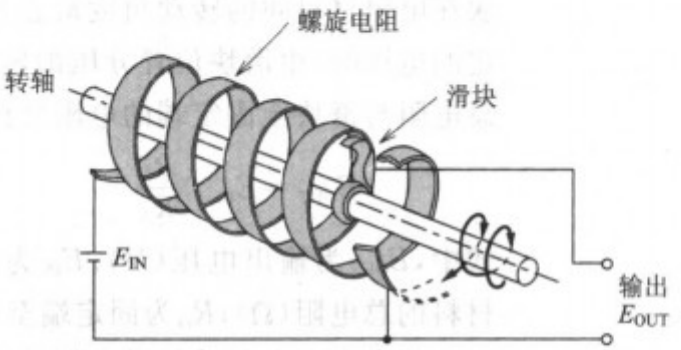


图 4.9　多圈型电位器的工作原理

金属电阻丝
碳膜　导电塑料
陶瓷电阻

在可变电位器中，电阻材料可以采用**金属电阻丝**、**碳膜**、**导电塑料**、**陶瓷电阻**等材料。根据不同的用途可变电位器可分为多种规格，阻值也从 100Ω～100kΩ，有多种规格。

高输入阻抗的差动放大器

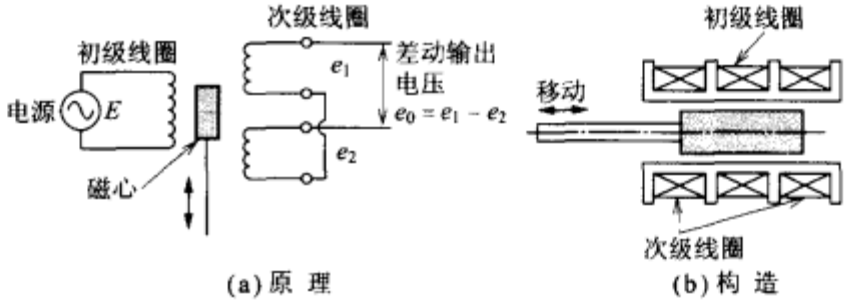
因为可调电位器的阻值相对较大，因此在精度要求较高的检测和控制电路中，常需要采用**高输入阻抗的差动放大器**进行阻抗变换。

差动变压器

差动变压器(differential transformer)的结构及原理如图 4.10 所示。当给初级线圈施加一个交流电压时，铁心中的磁通量将会随之发生变化，通过电磁感应，在次级线圈中将会产生一个与磁通量成正比的感应电动势。利用这一原理，若在初级线圈上施加一个稳定的励磁交流电压，则会在次级线圈上产生一个与铁心位置成正比的感应电压。将这

个电压整流成直流信号后取出，则可制成能检测铁心前端位移量的传感器。

差动变压器的检测范围通常在 5～200mm 范围内，也有的差动变压器只能检测±1mm 范围内的位移量。



(a) 原 理　　(b) 构 造

图 4.10　差动变压器的结构及原理

此外，差动变压器的灵敏度一般为每毫米位移输出 80～300mV 电压。由于它的信号电平高、输出阻抗低，因此具有很强的抗干扰能力。而且，若采用在初级线圈两侧反向缠绕次级线圈的结构，还可以根据输出电压的“+”、“−”极性，轻易地判别出物体的位移方向。

由于励磁电源会造成初级线圈发热，因此这一类传感器多在 1～5V、20mA 以内的条件下使用。

光电式角度传感器

光电式角度传感器
发光元件
半导体位置检测元件

光电式角度传感器的结构如图 4.11 所示。它的转动盘上带有螺线状的栅缝，当转动盘转动时，从**发光元件**发射的光按转动盘的转动角度照射到**半导体位置检测元件**的相应位置上，将轴的旋转角度变换成对应的电压信号，通过放大电路就可以检测出物体的旋转角度。

此类传感器的最大转动角为 120°和 340°，电源电压为 DC 5V 或 DC 12V，输出电压为 0.5～4.5V，分辨率较高。此外，其机械特性为扭矩小于 0.245mN·m，最高转速可达 200r/min。其应用领域与可变电位器相同，也是作为一种角度传感器用于检测各种轴的旋转角度。

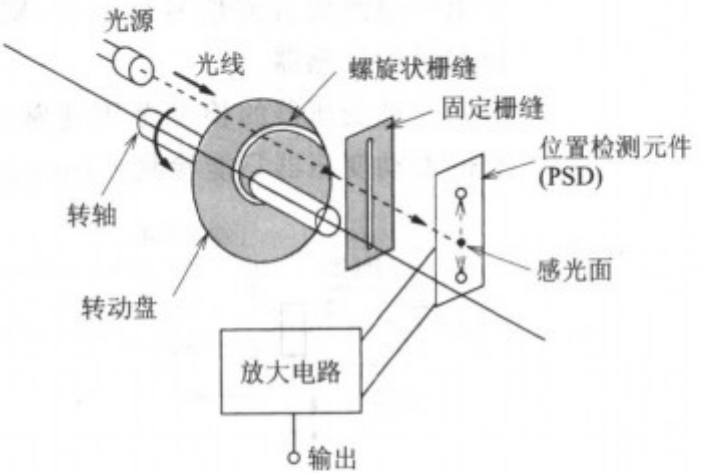
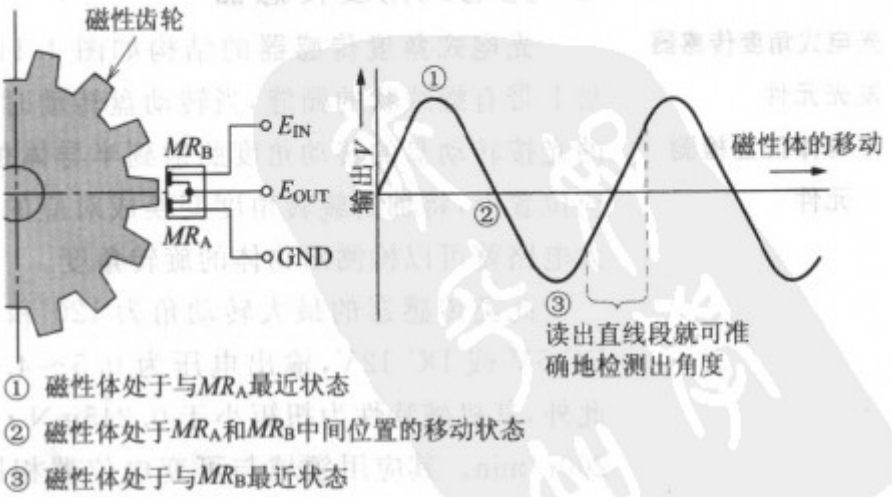


图 4.11 光电式角度传感器的结构

半导体角度传感器

半导体磁阻元件
磁性齿轮

以半导体材料制成的**半导体磁阻元件**为感应器件，当**磁性齿轮**转动时，由于外部磁场的强弱变化而引起元件的阻抗发生改变，使其输出的正弦曲线发生变化。若将该输出电压中仅有的一小段直线部分取出，就可以准确地检测出轴的转动角度。此外，采用这种传感器时，通过对输出脉冲的计数，还可以检测出轴的旋转角度及转数。这种传感器的结构如图 4.12 所示。



① 磁性体处于与MR_A最近状态
② 磁性体处于MR_A和MR_B中间位置的移动状态
③ 磁性体处于与MR_B最近状态

图 4.12 半导体角度传感器结构

半导体角度传感器

在**半导体角度传感器**中，电源电压有 5V、6V、8V 等多种规格，转动角度可以自由设定。此外，在机械特性上，它的扭矩比较小，一般小于 0.1mN·m，使用温度范围为

−10～+80℃，常作为检测角度及位置的传感器，用于加工机床(FA、OA)的测量仪器或建筑机械等设备中。

对于这种传感器，通常根据传感器中采用半导体磁阻数目的不同，输出电压可以分为 2 相、4 相等多种类型。这种传感器可以用来完成**转向控制**和高精度的**位置控制**。

转向控制

位置控制

相关知识

◆ 分辨率

分辨率是指传感器可以检测出的最小变化量。例如，有一只可以检测到1/100s的秒表，它的分辨率就是 1/100。

3　位置传感器

要　点

将用于检测物体有、无或对物体的位置及形状进行识别和判断的传感器称为位置传感器(position sensor)。

在位置传感器中，有限位开关、接近开关、固体图像传感器等多种类型的传感器。

解　释

限位开关

执行机构

限位开关

如图4.13所示，在**限位开关**(limit switch)的内部通常都具有可以检测是否有物体与其发生接触的机械式的**执行机构**(actuator)。当移动的物体碰撞到执行机构时，凸轮发生转动使凸轮槽内的弹子落下，从而触动微动开关实现电路的接通或断开，使用它可以检测出机床或机器人等移动物体的位置。

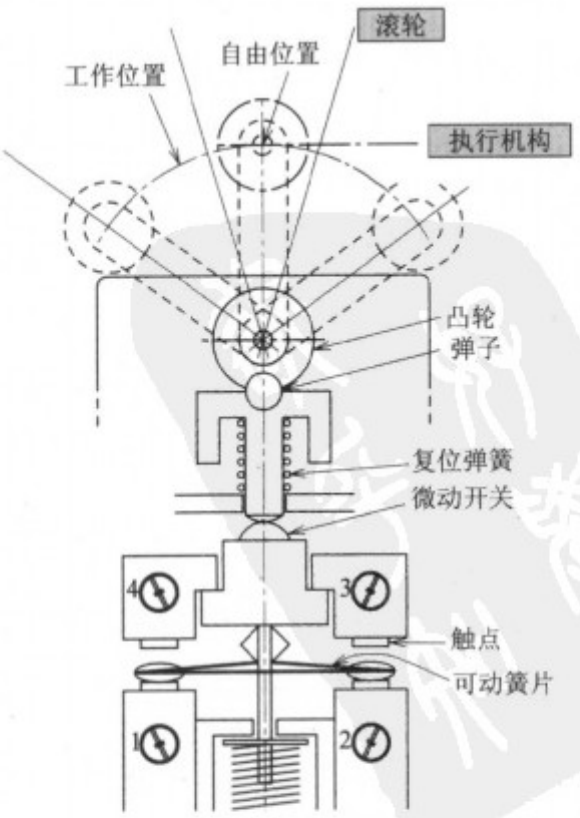


图4.13　位限开关

限位开关的内部为小间隙的触点结构，由凸轮槽和弹子的相互关系保证微动开关的位移量，不会发生超程现象。

撞针式
摆杆式　折页式

执行机构有按直线上、下运动的**撞针式**、做摆线运动的**摆杆式**及带有滚轮的**折页式**等多种类型，可根据需要加以选择。执行机构的主要类型如图 4.14 所示。

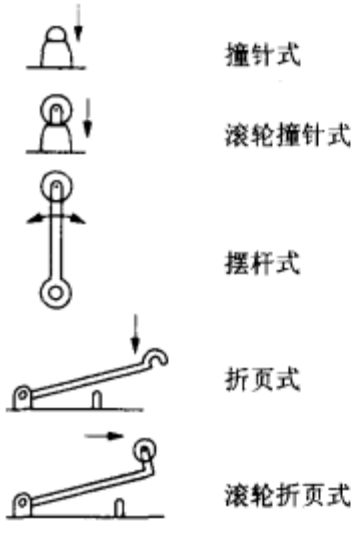


图 4.14　执行机构的主要类型

行程

执行机构可在 4.5～7N 力的作用下动作，执行机构从自由位置至极限位置的动作范围称为限位开关的**行程**。撞针式限位开关的行程为 1～2mm，摆杆式限位开关的行程为 60°。

根据应用环境的需要，有些产品将限位开关密封于金属或树脂盒内制成防水、耐油或防尘的结构。限位开关有 15A-AC 125V、6A-AC 250V、3A-AC 500V、5A-DC 24V、0.8A-DC 125V 等多种规格。

无触点型限位开关

有的限位开关中还装有霍尔 IC 芯片，构成能够防止误碰撞、具有去抖动功能的**无触点型限位开关**。

接近开关

高频振荡式
磁感应式
电容感应式
超声波式
电波发射式
气动式　光电式

在非接触式位置检测传感器中，有**高频振荡式**、**磁感应式**、**电容感应式**、**超声波式**、**电波发射式**、**气动式**、**光电式**、**光纤式**等多种接近开关(proximity switch)。

电容感应式(electrostatic capacity type)接近开关能够检测金属和非金属的被测物。它的工作原理是当有物体接近时，因静电感应使传感器中单极电容的电容量发生变化，

光纤式
电容感应式

从而使传感器内部的振荡电路起振或者停振，利用振荡信号的大小可以判断是否有物体接近，参见图 4.15。

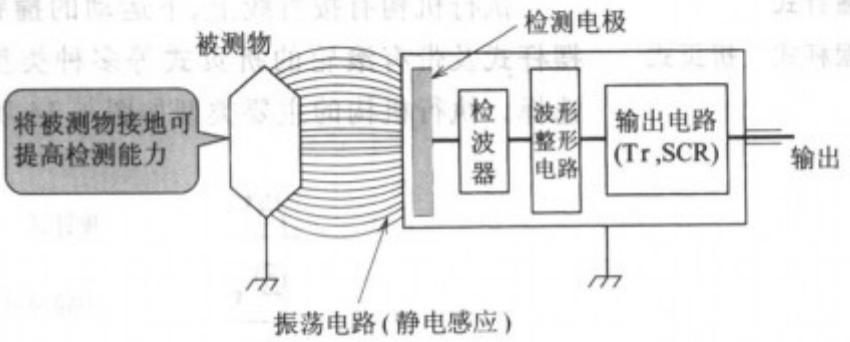


图 4.15 电容型接近开关的检测原理

在此类传感器中，电容 C(F)可由下式求出：

$$C=8.854\times10^{-12}\times\frac{\varepsilon_r A}{l}$$

式中，8.854×10^{-12}为真空介电常数(F/m)；ε_r为导体的相对介电常数；A 为电极的面积(m^2)；l 为接近距离(m)。

因此，只要检测出与电容量成正比的电压值，就可以求出被测物体的距离为

$$l=K\times\frac{8.854\times10^{-12}\times\varepsilon_r A}{E}$$

式中，K 为转换灵敏度；E 为输出电压(V)。

图 4.16 所示为用晶体管构成的电容感应式接近开关的电路原理。

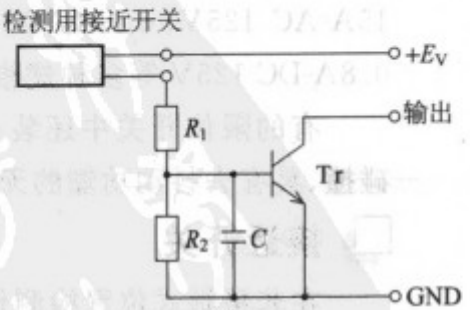


图 4.16 接近开关的应用电路

在电容感应式接近开关中，既有为了防止在发生电器故障时产生电火花引燃易燃性气体的低压(8V)小电流(5～6.5mA)的直流电流变化型接近开关，也有 12V 直流电压输出型、24V 直流开关输出型及 100～200V 交流开关输出型

等多种类型。此类传感器的检测距离也有 6～10mm、3～25mm 等多种规格。在外形封装上，此类传感器多采用圆柱形或棱柱形。

固体图像传感器

图像传感器
摄像管
固体传感器

图像传感器(image sensor)有**摄像管**及**固体传感器**两种。

固体图像传感器是将几十微米左右的光电转换元件排列成线状或面状结构，按时间顺序将各单元产生的光信号电荷作为图像信息取出的一种位置传感器。

CCD 型固体图像传感器

CCD(Charge Cougled Device)**型固体图像传感器**，是一种通过给传感器阵列施加移位脉冲，从而实现信号电荷传递的半导体器件。其基本结构如图 4.17 所示。

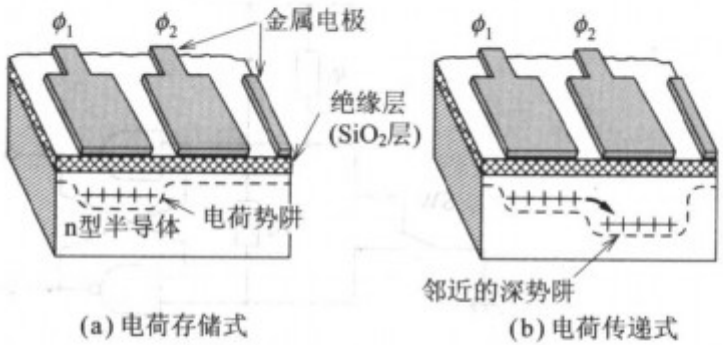


图 4.17 CCD 的基本结构及工作原理

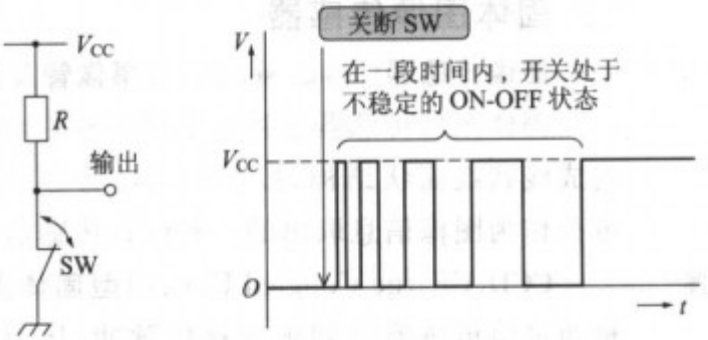
CCD 是在半导体表面涂敷的薄绝缘层上排列多个 MOS 结构构成的一种传感器。其工作原理是：当给某一金属栅极施加一电压时，则在该栅极下将形成电荷势阱，势阱中储存的电荷量与外部光照有关，光照越强电荷越多。由于该栅极上的电位越高其下的势阱就越深，所以当给邻近的栅极施加一个更大的电压时，因在各栅极上的栅极电压不同，就可以使储存在势阱中的电荷向邻近的势阱中移动，由此就可以完成信号电荷的顺序传递。

相关知识

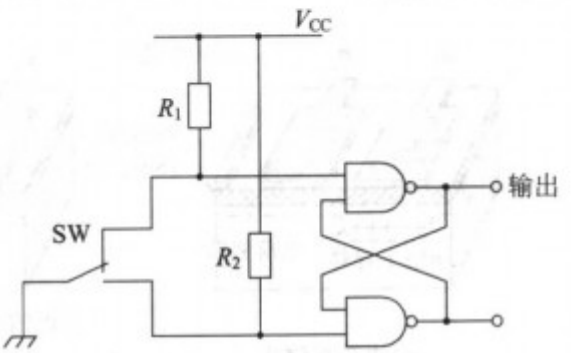
◆抖　动

机械式开关在进行开、闭(ON、OFF)(见图 4.18(a))的极短时间(10μs～

10ms)内,会产生不应有的触点抖动现象(见图 4.18(b)),将这种现象称为触点的抖动(chattering)。它是引起计数式电路误动作的原因之一。图 4.18(c)所示为一种去抖动电路。



(a) ON-OFF 动作　　(b) 抖动现象



(c) 去抖电路

图 4.18　抖动现象及去抖动电路

篇外话

视觉识别装置

这种装置能够接收由 CCD 摄像头拍摄下来的物体形态的图像信号,然后根据设定的条件(位置、大小、形状、个数、有无等坐标信号)对图像进行判定、识别等处理。图 4.19 所示为一个应用实例,它是由 CCD 摄像头构成一个检验系统,用该系统检查在高速传送的 IC 芯片上是否存在型号字符的印刷错误(如位置错误、文字颜色的深浅等)。

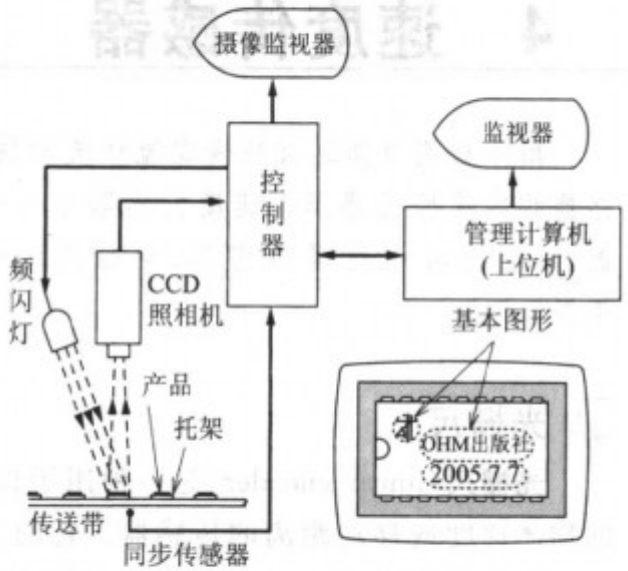

摄像监视器
监视器
控制器
管理计算机
(上位机)
频闪灯
CCD
照相机
基本图形
产品
托架
OHM出版社
2005.7.7
传送带
同步传感器

图 4.19 视觉识别装置

4　速度传感器

要　点

用于检测物体运动快慢或流体流动快慢等运动量的传感器称为速度传感器。速度传感器分为光栅尺、旋转编码器、压电振动式陀螺传感器、电磁式流速传感器等多种类型。

解　释

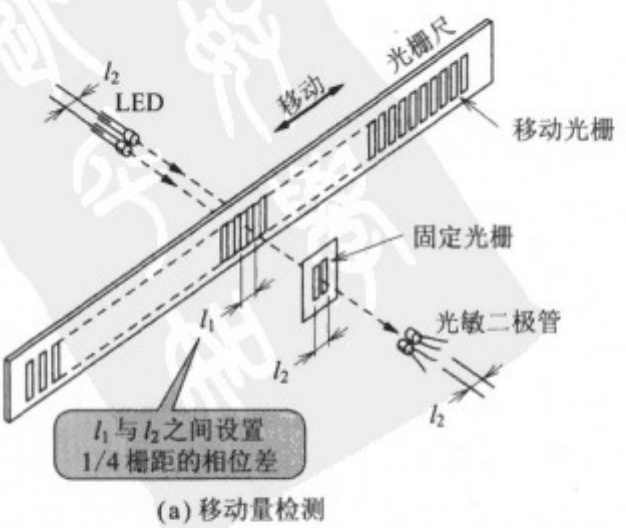
光栅尺

光栅尺

光栅尺(linear encoder)是一种用于检测沿光栅尺运动的物体速度或移动距离的传感器。它的工作原理是：以发光二极管为光源，通过在光栅尺上按固定间隔排列的栅缝，断续地将光照射到对面的光敏二极管上，再通过对光敏二极管接收的脉冲信号进行计数，来检测物体的移动距离。有的光栅尺的分辨率可以达到0.8nm。

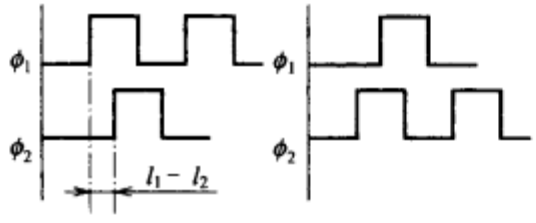
增量方式

用光栅尺检测物体的运动速度时，常采用**增量方式**，通过在固定时间内对光敏二极管接收的脉冲进行计数来测量物体运动的速度。在图4.20所示的光栅尺中，通过在固定栅板上配置两个能产生1/4间距相位差的栅缝，可以得到两相脉冲输出信号，通过对其相位差的检测，还能判断物体的移动方向。



(a) 移动量检测

图4.20　光栅尺



(b) 移动方向检测

图 4.20　光栅尺(续)

旋转编码器

光电旋转编码器

光电旋转编码器(rotary encoder)是检测转数或转速的数字式传感器。

光电旋转编码器的工作原理同光栅尺一样，都是通过检测脉冲信号来检测速度。旋转编码器通过转动圆形光栅盘来检测轴的转数或转速。

增量型
绝对型

按其结构的不同，可以将旋转编码器分为**增量型**及**绝对型**两种。

增量型旋转编码器

增量型(incremental type)**旋转编码器**的结构如图 4.21 所示。当动光栅盘与固定接收光栅板之间有光透过时，两处栅缝可产生 1/4 间距的相位差，通过两相输出可以判定旋转的正、反方向。此外，为了使动光栅盘在转动一周时能发出一个归零信号，动光栅盘上还刻有零点栅缝，通过它可以检测机器的原点，并对检测电路的计数累计误差进行修正。

由于增量型旋转编码器是通过脉冲计数来检测轴的旋转角度，因此它能对旋转量作无限制地计数，这是此类传感器的一个显著特点。

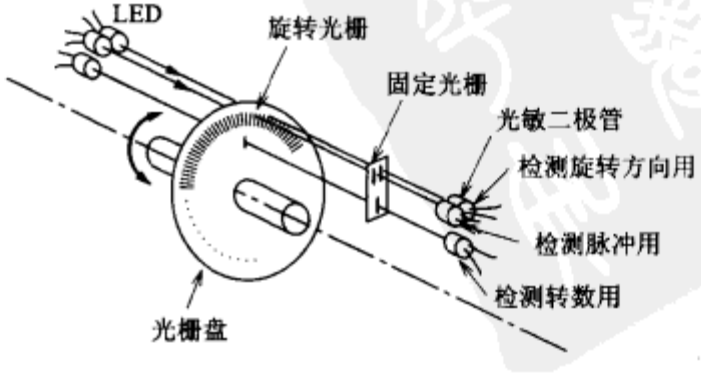


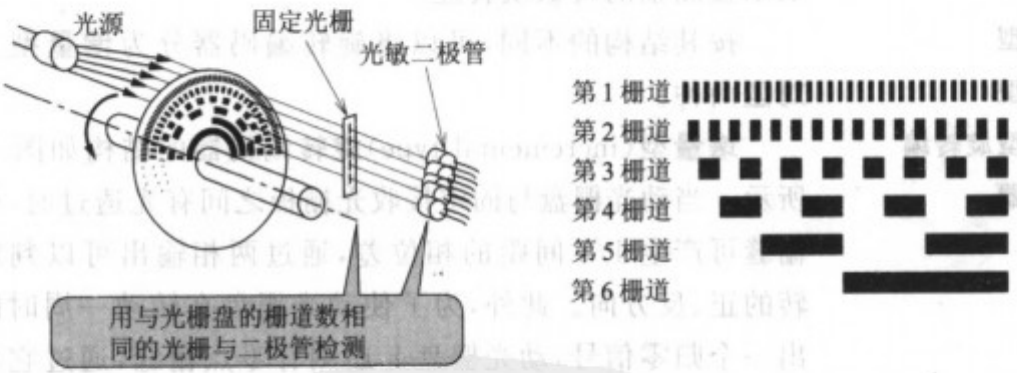
图 4.21　增量型旋转编码器结构

绝对型旋转编码器

绝对型(absolute type)**旋转编码器**结构如图 4.22 所示，该编码器是将动光栅盘按分辨率的位数划分成一系列同心圆，并将各同心圆的圆周按 2、4、8、16 的方式进行等分(构成编码盘)，在此类传感器中都会配有与同心圆数相等的发光二极管及光敏二极管，其输出为脉冲式编码信号。无论编码盘是否转动，它都会并行输出动光栅盘当前角度所对应的绝对位置的编码信号。

这类编码器都具有与分辨率位数相等的数字输出信号线。

在增量型旋转编码器中，电源电压为 DC5～30V、分辨率最高可达 10～9000 脉冲/圈；绝对型旋转编码器的电源电压 DC10～26V、分辨率最高可达 2048 脉冲/圈(11 位编码)。



(a) 构 造　　(b) 栅道数

图 4.22　绝对型旋转编码器结构

压电振动式陀螺传感器

陀螺传感器
振动式　气动式

陀螺传感器(gyroscope sensor)可以分为**振动式**和**气动式**两种。

向心力
科里奥利力

如果给单方向振动的物体施加角速度，那么，在与它垂直的方向上也会因**向心力**(Coriolis force，**科里奥利力**)而发生振动。振动式陀螺传感器就是利用这个原理，通过检测该向心力来获得角速度的传感器。

恒弹性金属镍铬合金
压电陶瓷片

图 4.23 所示为压电振动式陀螺传感器的结构。它在**恒弹性金属镍铬合金**(elinvar)制成的正三棱柱体表面粘贴有**压电陶瓷片**。

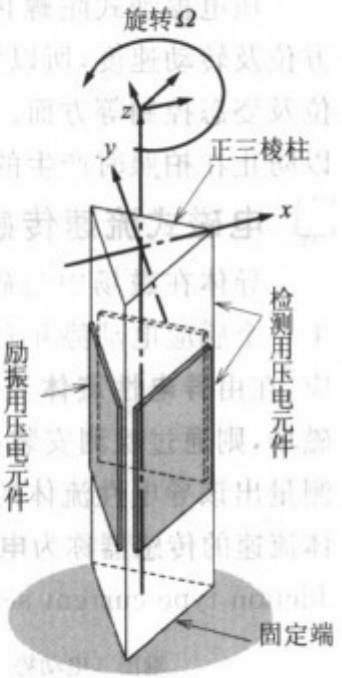


图 4.23 压电振动式陀螺传感器的结构

当它不转动时，由发振侧压电元件产生的振动，与其他两面压电元件产生的振动振幅相等；当它转动时，在正三棱柱体上产生应变，压电元件输出的振幅会出现差值。将此差值进行放大检波，就可以得到如图 4.24 所示的输出电压。

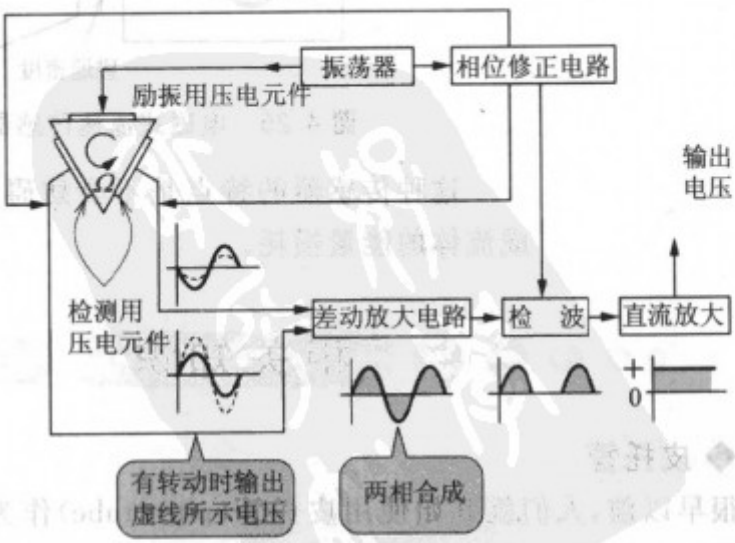


图 4.24 转速的检测原理

这种传感器的最高检测能力可达±90(°)/s 电源电压为8～13.5V，输出电压为 20mV/(°/s)。

压电振动式陀螺传感器可用来控制移动物体的姿态、方位及转动速度，所以常用于汽车、船舶、飞机、机器人的定位及姿态控制等方面。另外，它还用于照相机和录像机中，以防止在拍照时产生的颤抖等。

电磁式流速传感器

电磁感应

导电性流体

电磁式流速传感器

导体在磁场中与磁力线成直角运动时，该导体上将产生一个感应电动势并有电流流过。若利用这种**电磁感应**效应，在由**导电性流体**流过的管道垂直方向上施加一个外部磁场，则通过检测安装在管道上的两个电极电位差，就可以测量出该导电性流体的流速。采用这一原理制成的测量流体流速的传感器称为**电磁式流速传感器**(electromagnetic induction type current sensor)。其工作原理如图 4.25 所示。

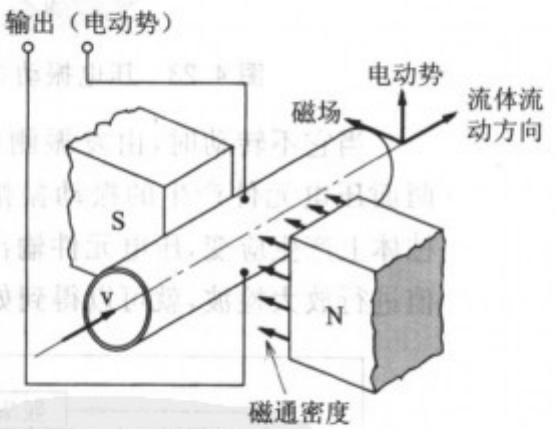


图 4.25　电磁式流速传感器的工作原理

这种传感器的特点是不会妨碍流体的流动，也不会造成流体的能量损耗。

相关知识

◆ 皮托管

很早以前，人们就开始使用皮托管(pitot tube)作为一种检测流体流速的传感器。皮托管可通过检测管的端部压力 p 与管的侧壁孔压力 p_0，根据压差求出流体的流速。

皮托管是一种高可靠性的流速传感器，现在的飞机上仍在使用。

◆ **向心力**

地球可看作是球形的，以两极为中心自转。地球表面上各点的自转速度不同，这与纬度有关，将纬度影响物体运动的力叫做向心力。

这个理论是法国的物理学家哥里奥利提出的。

在地球的北半球，向心力是与前进方向向右侧偏移的方向。如果飞机向正南飞行，如图 4.26 所示，受向心力的作用就会偏转位朝正南偏西的方向飞去。另外，台风之所以是逆时针旋转的涡流，也是因为风在向低气压中心移动的过程中受到了向心力作用的结果。

在南半球与在北半球正好相反。

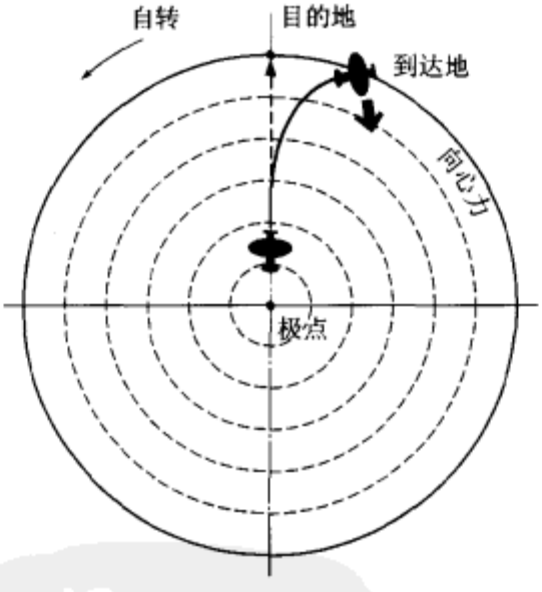


图 4.26 向心力

5　加速度传感器

要　点

加速度传感器是一种通过将其与被测对象接触或者将传感器安装在被测对象上来测量物体加速度的传感器。它广泛应用于振动或动态力的测量及控制等领域。

在使用时，应根据被测对象加速度的大小、频率范围等多种因素选择合适的传感器。

解　释

基础理论

振动子

加速度传感器是由弹簧系统支撑惯性质量构成所谓的“振动子”的结构。其基本结构如图 4.27 所示，运动方程式如下：

$$\frac{d^2x}{dt^2}+2\xi\omega_n\frac{dx}{dt}+\omega_n{}^2x=-\frac{d^2y}{dt^2}$$

$$\omega_n=\frac{k}{m}=(2\pi f_n)^2$$

$$\xi=\frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

式中，ω_n为共振频率；ξ为阻尼系数。

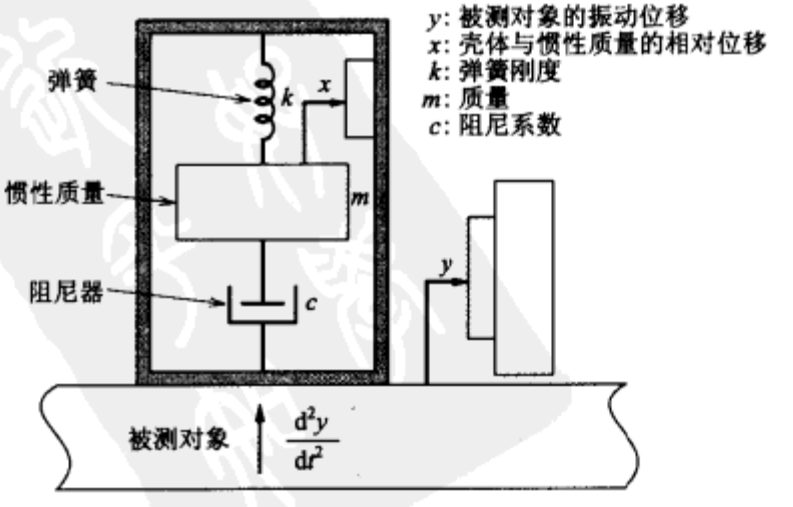


图 4.27　振动子基本结构

当检测仪的共振频率 ω_n 远大于被测对象的频率时，壳体与惯性质量的相对位移 x 与被测对象的加速度成正比；

ω_n很小时，壳体与惯性质量的相对位移 x 与被测对象的位移成正比。**振动传感器**就是根据这一原理制成的。

振动传感器

电容式加速度传感器

振子　电容

它是一种利用**振子**作为**电容**的一个电极制成的传感器，其基本结构如图 4.28 所示。

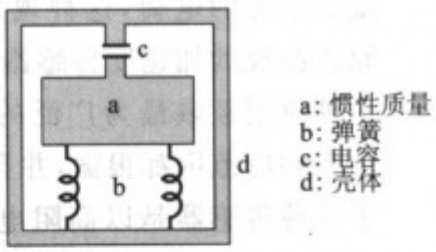


图 4.28　电容式加速度传感器的结构

因电容的极板间距随惯性质量的相对运动而变化，因此传感器中的电容量也将随之变化。这种传感器具有体积小、质量轻的特点，可以测量从**静态加速度**至几百赫[兹]的**动态加速度**。

静态加速度
动态加速度

金属应变片式加速度传感器

金属应变片

它是一种在振子上安装**金属应变片**构成惠斯通电桥的传感器，其基本结构如图 4.29 所示。



图 4.29　金属应变片式加速度传感器的结构

金属应变片能够将振子弯曲产生的应变量以阻抗变化的形式输出。这种传感器具有体积小、质量轻、可测量静态加速度等特点，但因其灵敏度较低，近来已很少使用。

半导体应变片式加速度传感器

其基本原理与金属应变片式加速度传感器基本相同。它是利用半导体材料的**压阻效应**，采用半导体应变片替代金属应变片而制成的一种传感器。半导体应变片式加速度传感器的灵敏度比较高，可广泛应用于各种领域。正在逐

压阻效应

步取代金属应变片式传感器，逐渐得到广泛普及。由于其灵敏度随绝对温度的升高几乎是成正比地减小，因此在使用此类传感器时需要采取温度补偿措施才能正常工作。

压电式加速度传感器

压电材料

压电效应

压电材料受压产生应变时，会在该材料上产生与应变量成正比的电荷，这种现象称为**压电效应**。根据压电效应原理制成的加速度传感器称为压电式加速度传感器。这是一种应用领域最为广泛的加速度传感器，它的测量范围及频率响应范围都很宽，并且具有体积、质量小等特点。但由于这种传感器是以高阻电荷方式输出，因此在使用时需按图 4.30 所示在输出端接入电荷放大器。

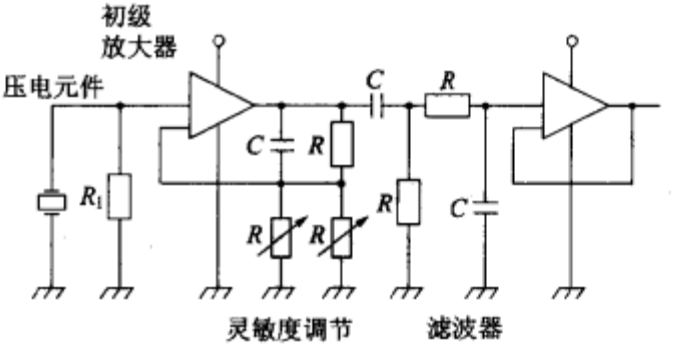


图 4.30　电荷放大器

相关知识

◆ 加速度传感器的使用注意事项

质量附加效应　在使用加速度传感器时，由于被测对象上安装了传感器（质量附加），因此实际的共振频率将会减小，而且还会出现衰减增加现象；当被测物体的质量较小、振动频率较高时，上述问题将会成为影响测量精度的主要问题。

接触共振问题　由于被测对象与传感器之间处于接触状态，因此，传感器的频率响应特性将会受到影响，特别是在高频情况下影响更大。若安装方法不当，就不能很好地发挥传感器的特点。

由此可知，在实际应用时，所采用的加速度传感器的质量应远小于被测对象。

◆ 地震传感器

液化气公司从防灾的角度采用 SI(spectral intensity)值来把握地震的大小。SI 值是将“地震对一般建筑物造成多大的摇摆”进行数字量化,通过对地动加速度的实时检测,从而计算得出的一种数据。以往使用的机械式、电气式传感器存在体积大、价格昂贵等缺点,而现在使用的压电式三维加速度传感器,体积只有以往地震传感器的 1/300 左右,价格也在其 1/4 以下。压电式三维加速度传感器的断面结构如图 4.31 所示。这种传感器只需采用一个元件几乎就可以独立测量三维加速度,这是因为它采用了特殊的电极结构,以及获取各电极间电位差的方法非常巧妙所致。



图 4.31 压电式三维加速度传感器的断面结构

◆ 安全气囊

作为汽车的一种安全装置,现在的汽车上都安装了安全气囊。当遇到前、后方向碰撞时,它能起到保护驾驶员的作用。如图 4.32 所示,它在汽车前副梁

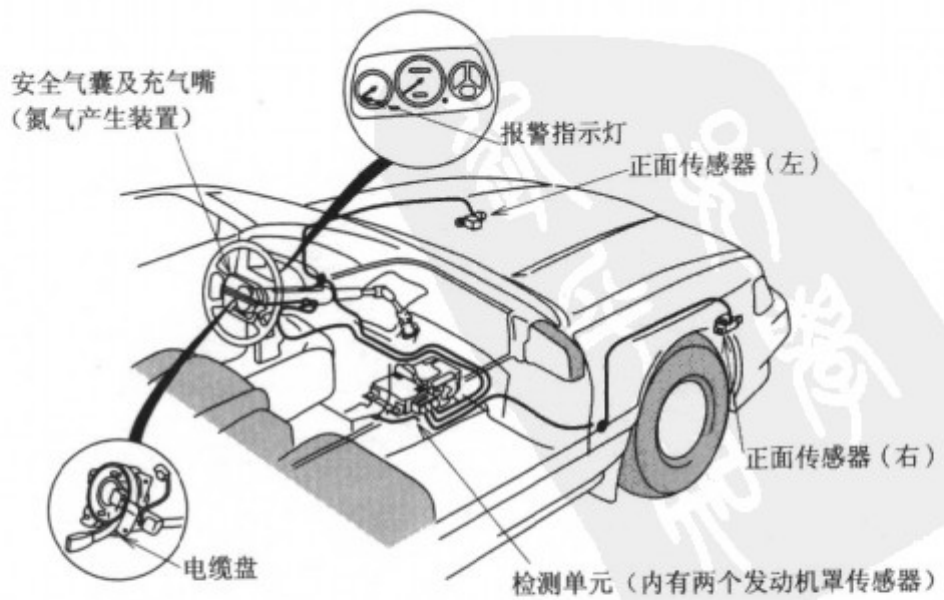


图 4.32 安全气囊系统的构造

左右两边，各安装一个能够检测前方碰撞的加速度传感器，在液压支架底座连接桥洞的前室内，也安装有两个同样的传感器。前副梁上的传感器一般设置成当受到12.3G以上的碰撞时能自动打开气囊开关的模式。12.3G以上的碰撞，相当于汽车以16km/h的速度，与前面障碍物相撞时产生的冲击。此外，室内传感器被设置成当从正面受到2.3G以上的冲击时，能自动打开气囊开关的模式。

汽车中使用的加速度传感器，因厂家和车型的不同而异，可分为机械式与电子式两种。

题外话

加速度的单位

国际单位(SI)：使用 m/s^2。

其他单位：用于地球物理学中表示重力加速度的单位有

伽(gal,Gal)$=10^{-2}(m/s^2)$；

吉(g,G)$=9.806\ 5(m/s^2)$。

6 距离传感器

要 点

在FA(Factory Automation)等领域，常采用距离传感器进行控制与检查。此外，在照相机等光学仪器中，也会利用距离传感器作自动对焦(AF：Auto Focus)的位置检测传感器。

距离传感器可分为超声波、光学和涡流式三种。

解 释

超声波距离传感器

超声波距离传感器

压电效应

超声波距离传感器由发射器和接收器构成。几乎所有超声波距离传感器的发射器和接收器都是利用**压电效应**制成的。

压电逆效应

压电正效应

其中，发射器是利用给压电晶体加一个外加电场时晶片将产生应变(**压电逆效应**)这一原理制成的。接收器的原理是：当给晶片加一个外力使其变形时，在晶体的两面会产生与应变量相当的电荷(**压电正效应**)，若应变方向相反，则产生电荷的极性反向。图4.33所示为一个共振频率在40kHz附近的超声波发射、接收器的结构。

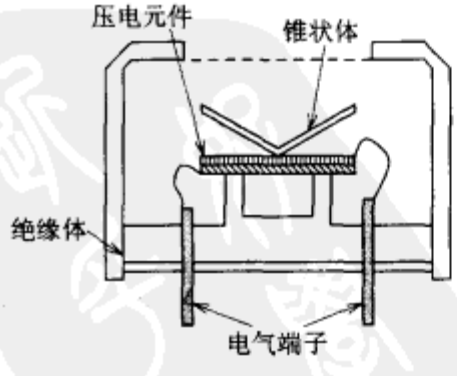


图4.33 超声波发射、接收器结构

脉冲回波式

FM-CW(频率调制-连续波)式

超声波距离传感器的检测方式有**脉冲回波式**(见图4.34)及**FM-CW(频率调制-连续波)式**(见图4.35)两种。

在脉冲回波式中，先将超声波用脉冲调制后发射，根据经被测物体反射回来的回波延迟时间 Δt，计算出被测物体的距离 R。假设空气中的声速为 V，由式(4.1)可求出被测

物体与传感器间的距离 R：

$$R=V\times\Delta t/2 \quad (\mathrm{m}) \tag{4.1}$$

如果空气温度为 T(℃)，则声速可由式(4.2)求出，即

$$V=331.5+0.607T \quad (\mathrm{m/s}) \tag{4.2}$$

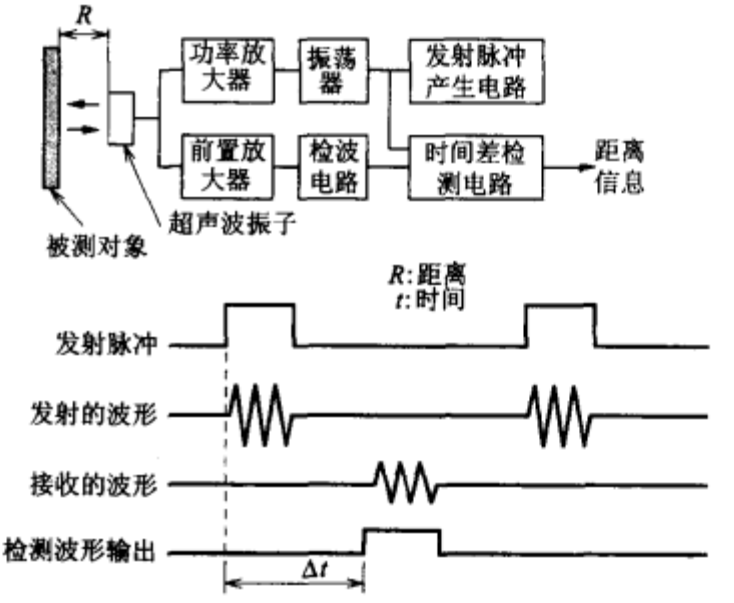


图 4.34　脉冲回波式的测距原理

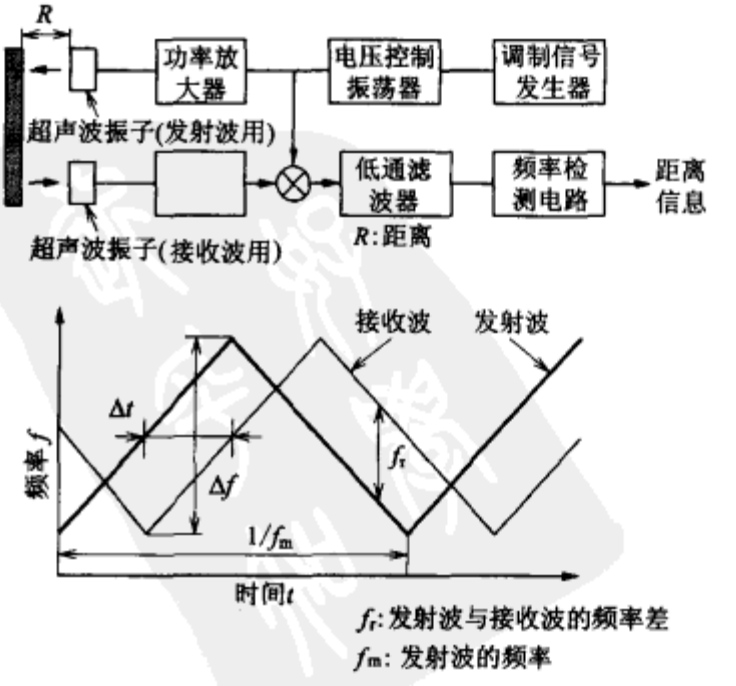


图 4.35　FM-CW 式的测距原理

FM-CW 方式是采用连续波对超声波信号进行调制。

将由被测物体反射延迟 Δt 时间后得到的接收波信号与发射波信号相乘，仅取出其中的低频信号，就可以得到与距离 R 成正比的差频 f_r 信号。假设调制信号的频率为 f_m，调制频率的带宽为 Δf，由式(4.3)可以求出被测物体的距离 R，即

$$R=\frac{f_r \mathrm{V}}{4 f_m \Delta f}\ (\mathrm{m}) \tag{4.3}$$

光学距离传感器

光学距离传感器的工作原理如图 4.36 所示。它是由**聚光元件**(半导体激光或 LED)发射的光，经聚光镜聚焦后照射到被测物体的表面上。被测物体表面反射的光用采光镜接收并在 **PSD**(位置检测器件)上成像，成像的位置因被测物体的位置不同而异。在 PSD 上的成像位置不同，会导致其两个输出端的输出电流比发生变化。这种传感器的结构如图 4.37 所示。

聚光元件

PSD

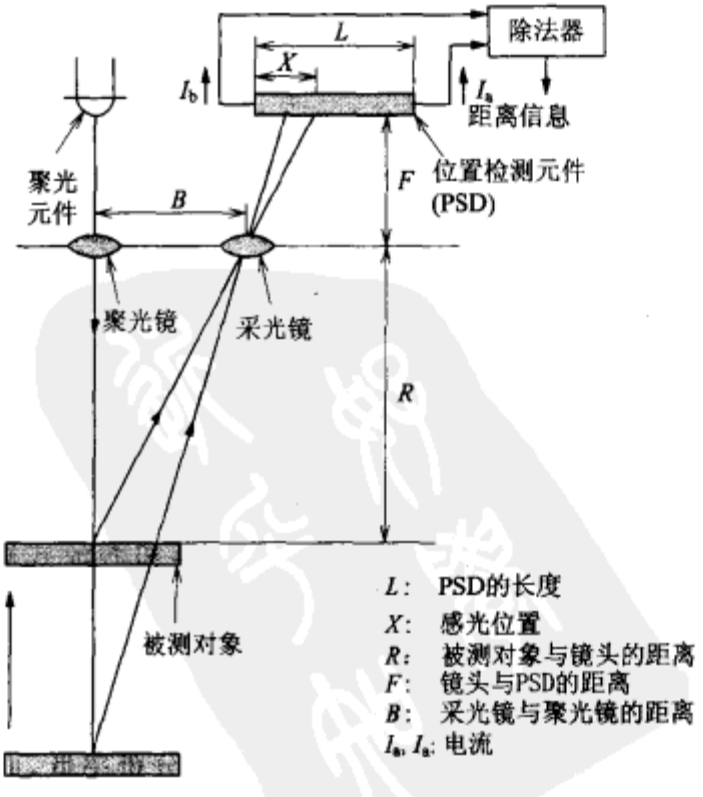


图 4.36　光学距离传感器的工作原理

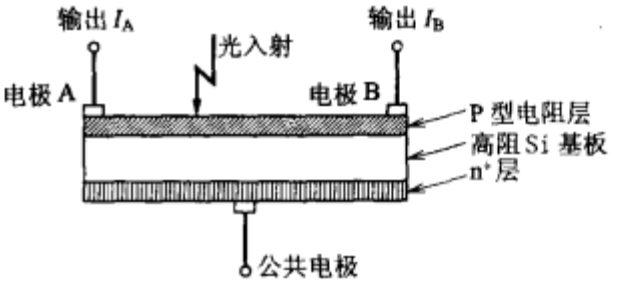


图 4.37　PSD(位置检测元件)的结构

假设 PSD 的长度为 L，成像位置与 I_b 输出端的距离为 X，则 I_a 与 I_b 的比值可由式(4.4)求出，即

$$I_a : I_b = X : (L-X) \tag{4.4}$$

若发光镜与接收镜的间距为 B，接收镜与 PSD 的间距为 F，则被测物体的距离 R 可由式(4.5)求出，通过除法器求出电流比 I_a/I_b，即可得出被测物体的距离 R，即

$$R=\frac{\left(1+\frac{I_a}{I_b}\right)BF}{L}\ (\mathrm{m}) \tag{4.5}$$

涡流式距离传感器

涡流式距离传感器

涡流式距离传感器是利用线圈和电容构成的检测头产生高频磁场，当被测物体接近检测头时，就会在被测物体上产生涡流，由于这个涡流的磁场效应，检测头的线圈阻抗将发生变化，由此可以测量被测物体的距离。

相关知识

◆ 距离传感器的选择标准

超声波距离传感器、光学距离传感器和涡流式距离传感器各有其优、缺点。在使用时，必须根据被测物体、所需精度及使用环境等条件，选择适当的传感器。

超声波传感器与光学传感器的比较　比较超声波传感器与光学传感器时，要了解超声波传感器的测量范围宽但分辨率低，而光学传感器的测量范围窄但分辨率高。两者的响应速度都在毫秒级，同属高速型传感器。

在使用时需要注意：超声波式传感器不受被测物体的透明度、颜色及电导率的影响，但它不适用于测量海绵或棉织物等吸音材料；而光学传感器会因被

测物体的颜色不同而产生测量误差，若以白色为基准，对黑色表面的测量误差将达到最大，因而使用受到限制。

涡流式传感器的特点 涡流式传感器的环境适应性好、响应特性及精度都很出色，但只能检测金属物体。相对于其他距离传感器能检测几十至几百毫米的检测范围，涡流式传感器的检测范围比较窄，检测范围在 10mm 以内。此外，它对微小物体的检测也比较困难。

7　光敏传感器

要　点

光敏传感器是一种能将光信号转换成电信号的传感器，如照相机的曝光器、遥控器的接收器、CD唱机的拾音器、光通信等，光敏传感器的应用范围很广，各领域都有光敏传感器的应用。可以预计，今后它的应用范围还会进一步拓展。

解　释

光敏传感器的种类

光敏传感器可以分成两大类，一类是将光直接转换成电信号的**光电效应型**光敏传感器；另一类是先将光转换成热量，然后再由热量转换成电信号的**热转换型**光敏传感器。通常，光电效应型的光敏传感器应用较多。

光电效应型

热转换型

在光电效应型的光敏传感器中，根据工作原理的不同还可以再进一步分为**光电子释放型**、**光电导型**及**光生伏特型**三种。

光电子释放型

光电导型

光生伏特型

光电子释放型传感器

光照射到此类传感器时，传感器上产生的**光电子**会释放到真空或空气中。某些材料对可见光的释放率很大，利用这种材料制成的感光面称为**光电面**。在利用上述现象制成的光检测或光计量器件中，最典型的有**光电管**及**光电倍增管**。光电倍增管是通过对光电面上释放出的光电子进行二次放大制成的一种光敏传感器，它能检测出光电管测量不出来的微弱光信号，其放大率一般在$10^5 \sim 10^7$范围内。

光电子

光电面

光电管

光电倍增管

光电导型传感器

光电导效应是指因光的照射使固体内产生自由电子和孔穴对，从而使其电导率发生变化的一种现象。通过求出光电导效应从而引起元件电极间的阻抗变化来检测光强的器件称为**光电导型传感器**。在这种传感器中，最常使用的、对可见光比较敏感的材料有硫化镉(CdS)及砷化镉(CdSe)。无论采用哪一种材料，这种传感器都是在陶瓷等基片上采

光电导效应

光电导型传感器

用粉末烧结工艺制成的，因其具有体积小、质量轻、价格低廉等特点，因此广泛应用于曝光器、路灯的**自动开关控制器**、**光控继电器**等方面。由于光电导型传感器的响应速度比较慢，因此这类传感器不适于检测快速变化的光信号，其结构如图 4.38 所示。

自动开关控制器
光控继电器

有些物质对于红外线的电导率很大，典型的有水银、镉、锑镉化汞（HgCdTe）等。其中，HgCdTe 器件对波长为 10μm 附近的红外线具有很高的灵敏度，因此常作为**红外分光计**或**热成像**（**红外线分布图像**）的感光器使用。

红外分光计
热成像
红外线分布图像

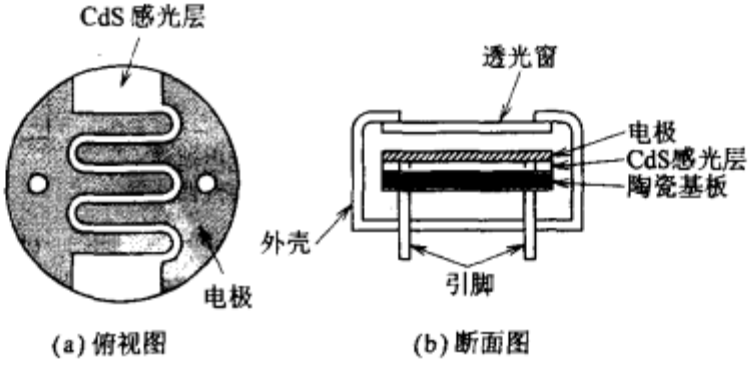


图 4.38 CdS 的结构

光生伏特型传感器

采用半导体晶体制成的 pn 结受到光照时，会在 pn 结上产生一个电动势，这种现象称为**光生伏特效应**。

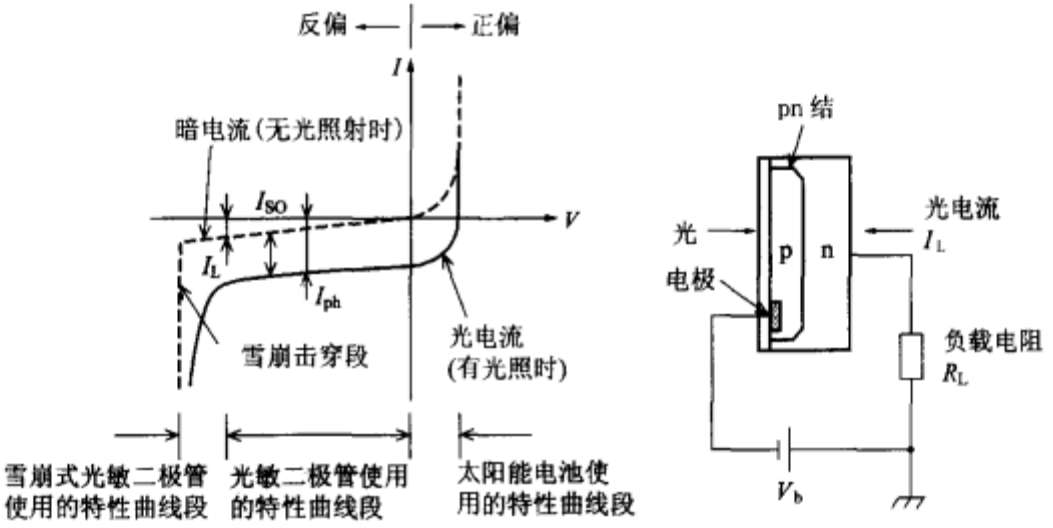
光生伏特效应

对于**光生伏特型**传感器，按给 pn 结施加的反向偏压不同，可以分为三种类型，即不加反向偏压的**光电池**、施加的反向偏压低于 pn 结击穿电压的**光敏二极管**以及施加的反向偏压几乎与 pn 结击穿电压相等的**雪崩式光敏二极管**。

光生伏特型
光电池
光敏二极管
雪崩式光敏二极管

光敏二极管 图 4.39(a)所示为 pn 结的电压-电流特性。当外部电压 $V_b=0$ 时，若有光照射到 pn 结上，就会在 pn 结上产生与入射光强度成正比的反向光电流 I_{ph}。如果这个光电流流过外部电路，就会在负载 R_L 的两端产生电压 V，而这个电压又将使光敏二极管正偏置，从而使光敏二极管中流过一个正向电流 I_F，因此流过外部电路的电流 I_L 为这两个电流之差，即 $I_L=I_{ph}+I_F$（式中的电流方向不同）。当负载电阻 R 极小、器件的两个输出端之间几乎短路时，由

于电压 V 极小，因此 $I_L \approx I_{ph}$，即当入射光量很少、负载电阻也很小时，光电流及光生电动势都与入射光强度成正比。图 4.39(b)所示为光敏二极管的结构。



(a) pn结的电压-电流特性　　(b) 光敏二极管的结构

图 4.39　光敏二极管的结构与电压-电流特性

由于光敏二极管能在无外电源的条件下工作，因此作为一种简易设备的光敏传感器，广泛应用于各种领域。

雪崩式光敏二极管　给 pn 结加一个几十伏至 200V 左右的反向偏压时，该 pn 结就会产生光电流的放大作用。这种现象称为**雪崩效应**，利用雪崩效应制成的光敏器件，能得到远大于光敏二极管的光电流。因雪崩式光敏二极管的响应速度快、S/N 高，因此在大容量的**光通信系统**中常采用它作为感光元件。

雪崩效应

光通信系统

光敏三极管　在制造 npn 型或 pnp 型半导体晶体管的过程中，若将基极开放作为感光面制成与光敏二极管一样的两端器件，这种器件就称为**光敏三极管**。

光敏三极管

由于光敏三极管内部具有电流放大作用，因此它的灵敏度也为普通光敏二极管的数倍。虽然它的响应速度比雪崩式光敏二极管慢，但因其不需要很高的驱动电压，因此更适于一般性的应用。其基本结构如图 4.40 所示。

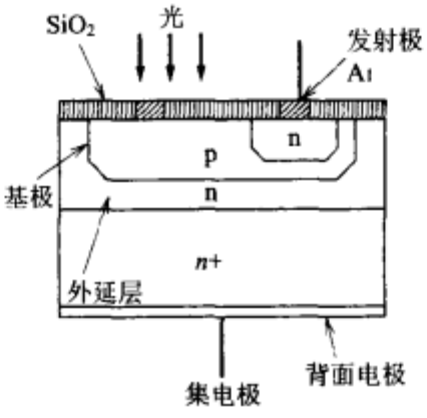


图 4.40　光敏三极管的结构

相关知识

◆ 光波波长及光敏传感器的应用范围

图 4.41 所示为光波波长及相应光敏传感器的应用范围。

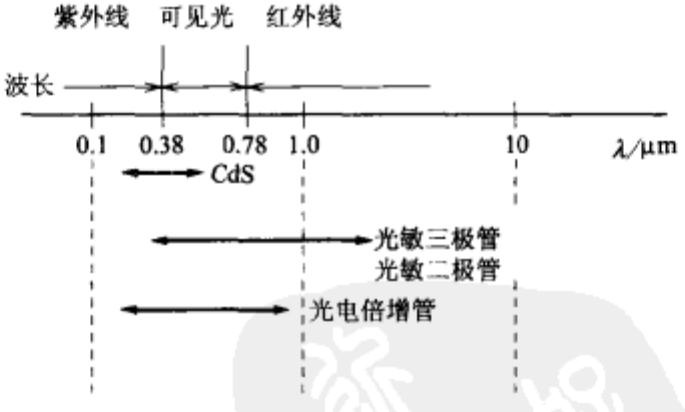


图 4.41　光波波长及相应光敏传感器的应用范围

◆ 红外线传感器与红外线遥控器

红外线传感器　图 4.42 所示是一种将红外发光二极管与光敏三极管封装在一起构成的红外线传感器示意。通过调整发光强度、传感器与被测对象间的距离及感光起始电平等，就可以用它进行各种非接触式的测量与控制。在这类传感器中，有些传感器为了防止自然光及噪声等因素造成的误动作而制成的，在发光侧还配备了光信号调制电路。其基本电路结构如图 4.43 所示。

红外线遥控器　在电视等一些家用电器中，广泛采用了红外线遥控器，其基本原理与红外线光敏传感器相同。为了能用相同波长的红外线实现对同类型多种装置的控制，在它的发射器与接收器中，分别采用了与之配套的专用编码器

及解码器，从而防止与其他同类设备的信号混淆或因噪声干扰等引起的误动作。

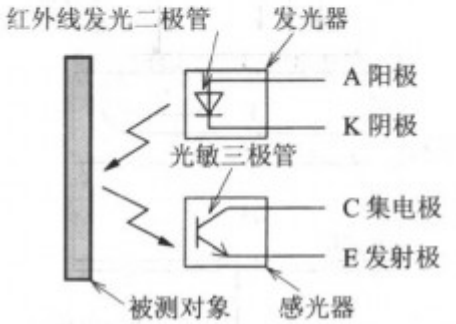


图 4.42 红外线光敏传感器的结构(反射式)

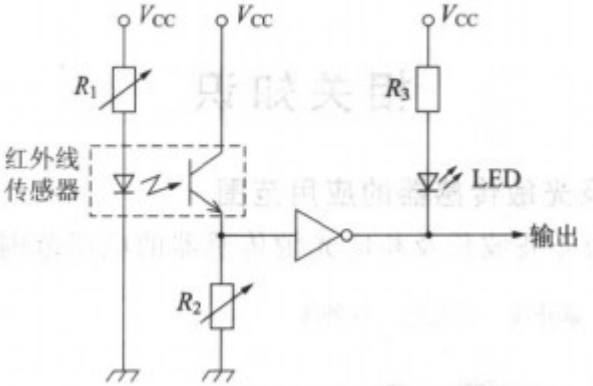


图 4.43 红外线传感器的应用电路

◆ 色敏传感器

光都有自己固有的波长区域。色敏传感器是由将白光分解为红光 R(red，波长 660nm)、绿光 G(green，波长 540nm)、蓝光 B(blue，波长 460nm)，这三个滤色片和三个光敏二极管构成，其构造如图 4.44 所示。

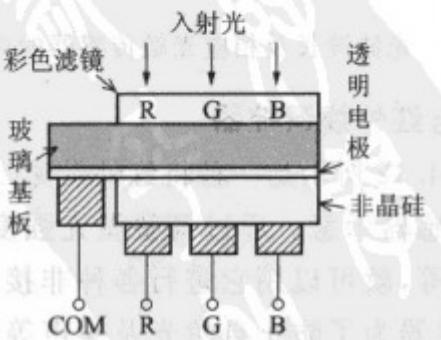


图 4.44 色敏传感器的构造

图 4.45 是色敏传感器的光谱灵敏度特性。由图可知，R、G 和 B 的处理几乎相同，所以在分解三原色时，它能够识别包含中间色在内的 12 种以上的颜色。可用于检测投影机和电视机的亮度、摄像机的白平衡等。

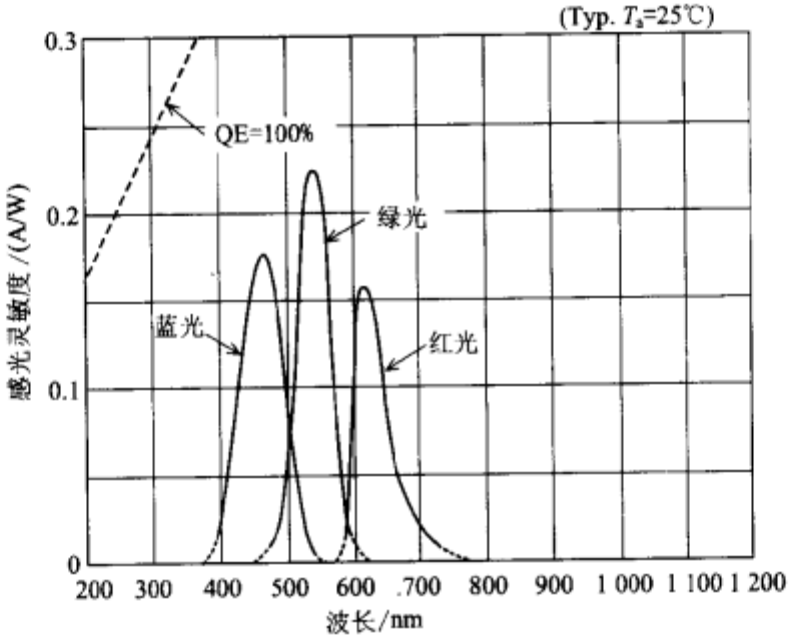


图 4.45 色敏传感器光谱灵敏度特性

8　磁敏传感器

要　点

磁敏传感器原本是用来测量磁场的，但现在更多地用于检测物体的位置及转动，也常用于检测电流或对开关等其他物理量的测量及控制。

在磁敏传感器中，主要有半导体霍尔元件、半导体磁敏电阻、磁性体磁敏电阻、电磁感应式磁敏传感器等4种器件。如有特殊用途，还可以采用光纤磁敏传感器。

解　释

半导体霍尔元件

半导体磁敏传感器　**半导体磁敏传感器**的基本工作原理是**霍尔效应**。当半导体中流过一个电流时，若在与该电流垂直的方向上外加一个磁场，则在与电流及磁场分别呈直角的方向上会产生一个电压。这种现象称为霍尔效应。

霍尔效应

半导体霍尔元件　霍尔效应产生的电压与磁场强度成正比。为减小元件的输出阻抗，使其易于与外电路实现阻抗匹配，**半导体霍尔元件**多数都采用十字形结构，如图4.46所示。霍尔元件多采用**锑化铟**(InSb)及**硅**(Si)等**半导体材料**制成。由于这种材料本身对弱磁场的灵敏度较低，因此，在使用时要加入数T(特[斯拉])的偏置磁场使器件在处于强磁场的范围内工作，从而可以检测微弱的磁场变化。

锑化铟　硅

半导体材料

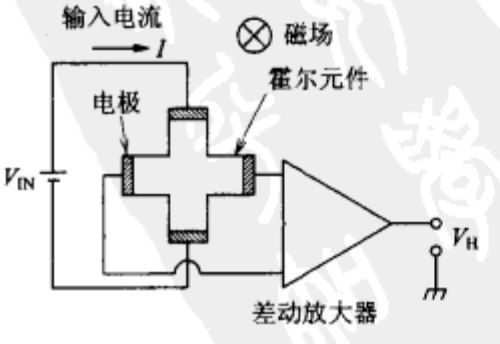


图4.46　半导体霍尔元件的结构

半导体磁敏电阻

半导体磁敏电阻　**半导体磁敏电阻**是一种利用磁场作用产生的电流偏转

使元件阻抗增加这一特点制成的双端磁敏传感器。同霍尔元件不同，这种元件采用缩短电流电极间距离的结构来提高其磁灵敏度。

如图 4.47 所示，半导体磁敏电阻采用在半导体中埋入多根金属电极的方法，将多个磁敏电阻串联起来以提高其阻值。

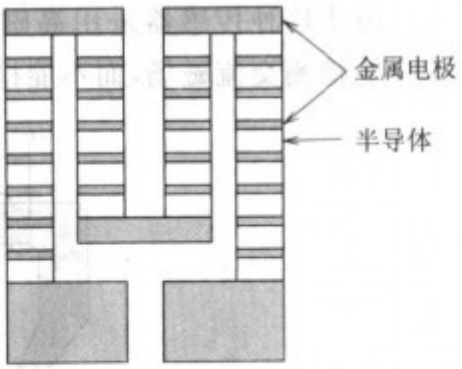


图 4.47 半导体磁敏电阻的结构(蛇形元件)

磁性体磁敏电阻

磁性体磁敏电阻是一种利用强磁性材料的磁场异向性制成的**磁敏元件**。如图 4.48 所示，若在强磁体薄膜易磁化轴的垂直方向上加一个外部磁场，则由于材料内部的磁偏转会使元件内部电阻发生变化。为了提高元件的输出幅值，磁性体磁敏电阻在结构上采用**坡莫合金**等强磁性材料薄膜以增大阻抗。与半导体磁敏电阻相比，这种传感器对弱磁场灵敏度相对较高，但它的线性范围较小。

磁敏元件

坡莫合金

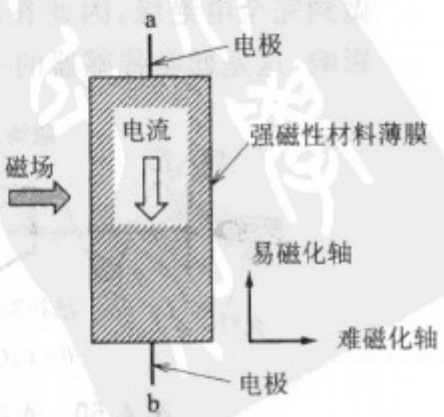


图 4.48 磁性体磁敏电阻的结构

电磁感应型磁敏传感器

电磁感应型磁敏传感器
线圈型磁头
拾音线圈
法拉第电磁感应定律
高磁导率轭铁

在典型的**电磁感应型磁敏传感器**中，有**线圈型磁头**及**拾音线圈**等。这种传感器的灵敏度很高，力学性能也好，是一种通用型磁敏传感器。若线圈内的磁通量发生变化，在线圈的两端就会产生感应电动势。这是一种利用**法拉第电磁感应定律**制成的传感器。图 4.49 所示为线圈型磁头。由于这种传感器采用**高磁导率轭铁**聚集磁力线，因此它只能检测交流磁场，而不能检测直流磁场。

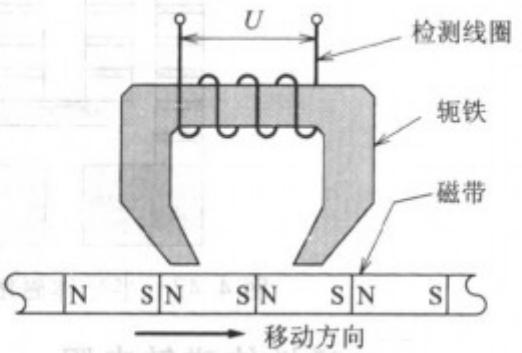


图 4.49　电磁感应型磁敏传感器磁头

光纤型磁敏传感器

亚砷化锌
光学材料
法拉第磁光效应

如图 4.50 所示，若用光纤将光导入到**亚砷化锌**(ZnSe)等**光学材料**(法拉第磁光效应器件)中，并在与光平行的方向上施加一个外部磁场，则根据**法拉第磁光效应**，输出光的偏光面将会发生偏转。利用这种偏转角度与磁场强度有关的特点，可以对磁场强度进行测量。因为这种传感器能够做到完全电绝缘，因此在测量时完全不会受到电磁感应的影响，这是此类传感器的一大优点。

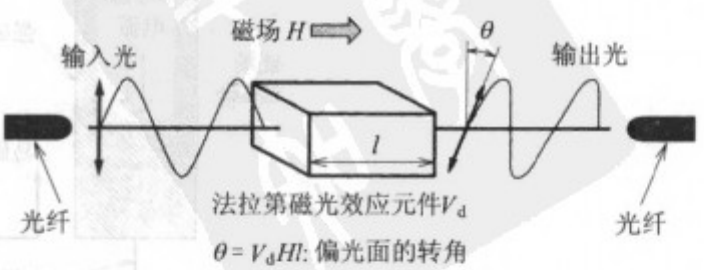


图 4.50　光纤型磁敏传感器的结构

相关知识

◆ 磁敏传感器的应用

由于磁敏传感器具有体积小、质量轻等特点，因此在很多方面都有广泛应用。

① 电流计：图 4.51 所示为卡形电流计，它将导线电流产生的磁场引入到高磁导率的磁路中，通过磁路中插入的霍尔元件对该磁场进行检测，以此测量导线上的电流。这种电流计的测量范围很宽，可以测量从直流到高频的电流。

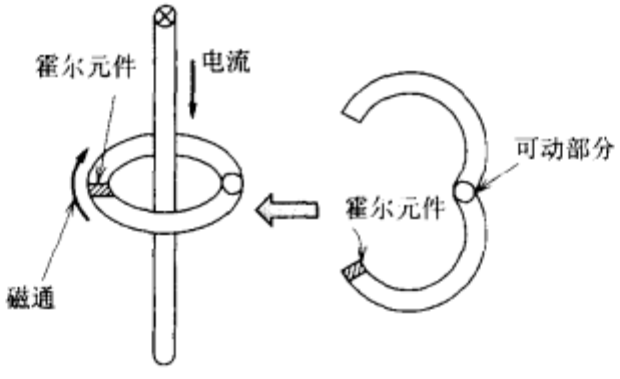


图 4.51 卡形电流计的结构

② 磁感应开关：它是一种通过改变磁敏传感器与磁铁间的距离，从而实现开、闭的非接触型开关。由于无摩擦，因此具有寿命长、可靠性高等特点。

③ 磁敏电位器：可分为用于测量磁敏电阻与磁铁间直线位移的直线式磁敏电位器和转动式磁敏电位器两种。

④ 霍尔电机：它是一种采用检测位置的霍尔元件制成的一种无刷电机，因其具有一个元件可控制两组晶体管的优点而倍受青睐，是当今无刷电机中使用最多的一种电机。因为这种电机无电刷，因此具有体积小及无噪声等优点，广泛用于盒式录音机、VTR、FDD 等需要进行转动控制的精密机械中，其结构如图 4.52 所示。

⑤ 纸币及预付卡识别设备：在对纸币或支票等含有磁性油墨印刷的文字或符号产生的磁场形状进行识别时，通常采用高灵敏度的单晶 InSb 半导体磁敏电阻等元件制作检测传感器。它广泛应用于自动售货机、自动售票机、纸币兑换机及各种预付卡式设备中。

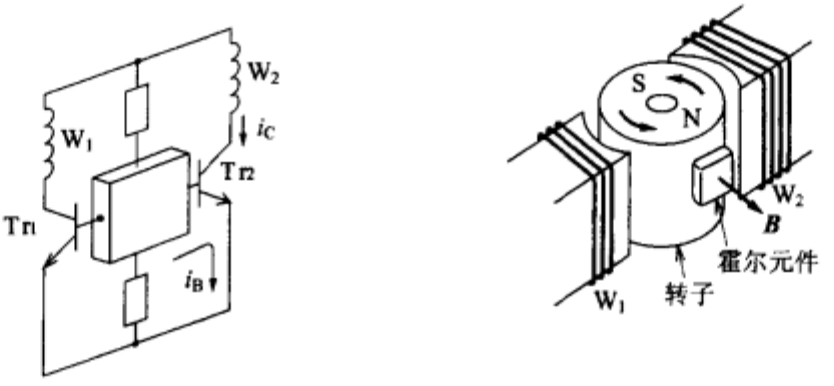


图 4.52　霍尔电机的结构

9 温度传感器

要 点

温度传感器是一种能将温度转换成电信号的传感器。在温度传感器中有双金属传感器、热敏电阻、热电偶、金属测温电阻、IC 温度传感器、红外线温度传感器等多种类型。

解 释

热敏电阻

热敏电阻

热敏电阻(thermister)是一种当温度变化时电阻的阻值能敏感变化的元件，一般是由锰、镍、钴、铁、铜等金属氧化物烧结而成。

根据温度特性的不同，可将热敏电阻分为三种类型，即

NTC 型热敏电阻

随温度升高其阻抗下降的 **NTC 型热敏电阻**(negative temperature coefficient thermistor)、

PTC 型热敏电阻

当超过某一温度后其阻抗急剧增加的 **PTC 型热敏电阻**(positive temperature coefficient thermistor)和

CTR 型热敏电阻

当超过某一温度后其阻抗急剧减小的 **CTR 型热敏电阻**(critical temperature resistor thermistor)。在温度测量方面，多数采用 NTC 型热敏电阻。这三种热敏电阻的温度特性曲线如图 4.53 所示。

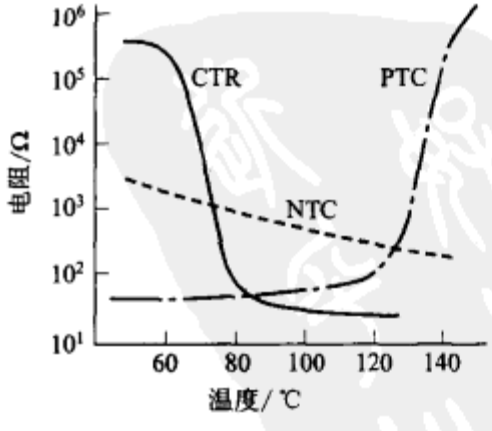


图 4.53 NTC、CTR、PTC 的温度特性曲线

球形
圆形
条形

按形状的不同，热敏电阻可以分为**球形**、**圆形**、**条形**三种，每种类型都有多种规格。在 JIS 的 JIS C 1611 项中，对可互换的热敏电阻都有标准规定。

热敏电阻的连接方法如图 4.54 所示，其使用温度为

−50～+350℃。在由阻值求解被测物体的温度时，需要根据热敏电阻的温度特性曲线进行对数运算。若将表示阻抗变化的电压变化信号进行 A/D 转换后，由微机完成这种数据处理，就会使温度的计算变得非常简单。其计算公式如下：

$$T=\frac{1}{\frac{\ln(R/R_0)}{B}+\frac{1}{T_0}}$$

式中，T 为被测温度；R 为被测温度下的阻值；T_0 为基准温度；R_0 为基准温度下的阻值；B 为热敏常数；ln 为自然对数。

热敏电阻的特点是灵敏度高，价格较低，因此是温度传感器中应用较多的传感器之一。

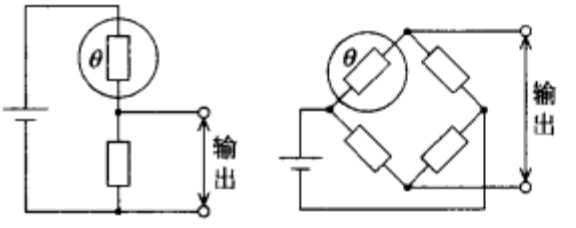


图 4.54　热敏电阻的连接示例

金属测温电阻

测温电阻
白金测温电阻
低温型
中温型
高温型

一般金属均是随着温度升高其阻值将成正比例地增加。利用这种特性，可以制成**金属测温电阻**。在 JIS 的 JIS C1604项中有对铂测温电阻的标准规定。因为**白金测温电阻**的特性十分稳定，因此被广泛应用于工业中的高精度测温。按使用温度范围的不同，铂测温电阻可以分为**低温型**(−200～+100℃)、**中温型**(0～+350℃)及**高温型**(0～+650℃)三种。图 4.55 所示为铠装白金测温电阻的结构。

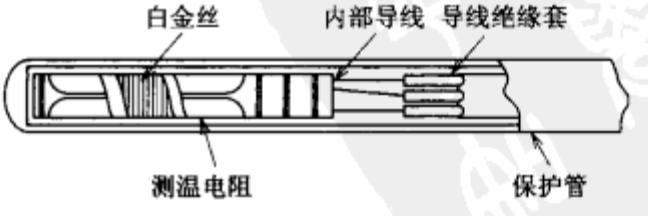


图 4.55　铠装白金测温电阻的结构

热电偶

如图 4.56 所示，将两种不同金属的两端相连接构成闭

合回路，当这两个连接点的温度不同（有一个温度差）时，会因为回路中产生一个电动势而有电流。这种现象称为**塞贝克效应**（Seebeck effect），所产生的电动势称为**热电动势**（thermoelectromortive force），流过的电流称为**热电流**（thermoelectric current）。**热电偶**（thermocouple）就是一种利用塞贝克效应制成的温度传感器。

塞贝克效应
热电动势
热电流　热电偶



图 4.56　热电偶

若按图 4.57 所示用电压表可测量出热电偶的热电动势，就能求出连接点的温差，由此可以计算出被测物体的温度。然而，当冷接点为非 0℃的常温时，如果不对热电偶进行温度补偿，就不能得到正确的测量结果。热电偶的测温范围为－200～＋2400℃，因能测量高温，因此广泛应用于工业测温中。在 JIS 的 JIS C 1602 项中有标准规定，根据材料的不同，可将热电偶分为 B、R、S、E、J、T 几种类型。此外，由于热电偶的热电动势很小，因此在将热电偶产生的信号输入给微机处理前还需要对该信号进行放大处理。图 4.58 所示为一个铠装热电偶传感器的结构。

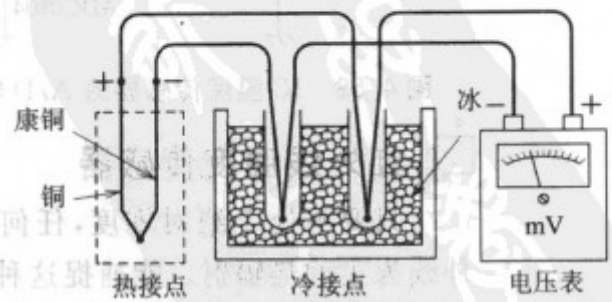


图 4.57　热电偶的工作原理

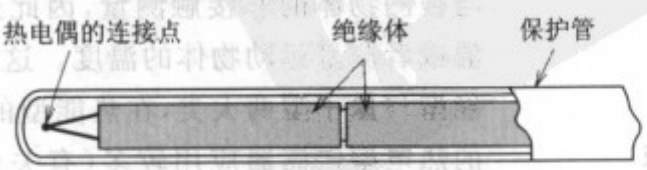


图 4.58　铠装热电偶传感器结构

IC温度传感器

IC温度传感器

二极管的正向偏压阈值及晶体管基极与发射极间的正向偏压阈值都具有温度敏感特性。利用这种特性，可以将二极管或晶体管以及能对其输出电压进行线性补偿的电路集成在一个芯片上制成**IC温度传感器**。其具有体积小、线性好等特点，是一种使用方便的温度传感器。在这种传感器中，有温度系数为8.0mV/K、测温范围为－40～＋100℃的S-8100B芯片及输出电压为0mV＋10.0mV/℃、测温范围为2～150℃的LM35DZ芯片等多种产品。图4.59所示为一个采用IC温度传感器测温并进行A/D转换的示例。

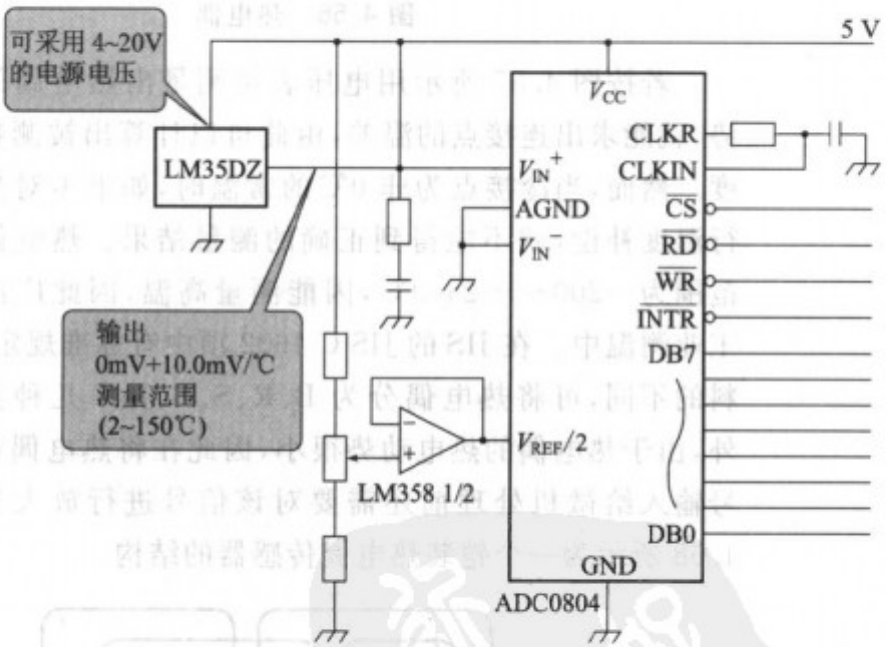


图4.59 IC温度传感器的A/D转换示例

红外线温度传感器

红外线温度传感器
热能型
量子型
热电效应
热电型传感器

只要不处于绝对零度，任何物体都会向外部发射以红外线为主的热辐射。能捕捉这种能量实现测温的传感器称为**红外线温度传感器**。由于采用这种传感器能实现传感器与被测物体的非接触测量，因此这种传感器多用于测量高温或者测量运动物体的温度。这种传感器大致可以分为**热能型**与**量子型**两大类，在热能型的传感器中，利用**热电效应**的**热电型传感器**应用较多（有关量子型的传感器请参照光敏传感器的相关知识）。

在钛锆酸铅或钽酸锂等能发生极化作用的物质中，当温度稳定时空气中的悬浮电荷会相互抵消，但受热后因发生极化作用而吸附了残余电荷，在电极间产生电压的现象叫热电效应(见图 4.60)。

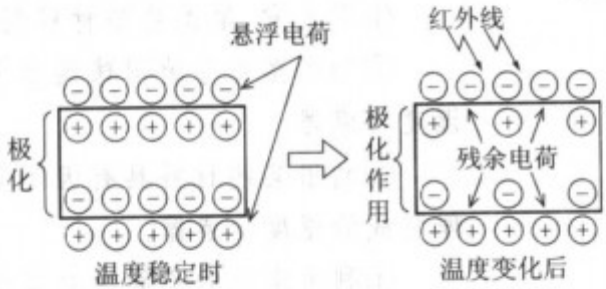


图 4.60 热电效应的原理

因热电元件的阻抗高，所以热电型红外线传感器的内部要安装 FET 模块，见图 4.61。另外，为了确定检测范围和检测距离，这种传感器通常都与光学透镜(菲涅尔透镜)组合使用，见图 4.62。在使用上需要注意的是，只有在温度变化时才能够产生检测信号。

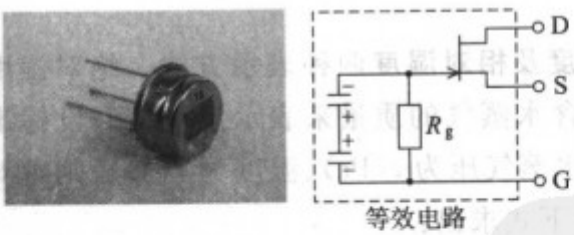


图 4.61 热电型红外线传感器



图 4.62 菲涅尔透镜

相关知识

◆ 温度单位

在温度单位中，有热力学单位 K(绝对温度)及日常生活中使用的℃(摄氏温度)。0℃＝273.15K。

10　湿度传感器

要　点

湿度传感器有以下几种类型：

①用毛发、尼龙片等材料制成的机械式湿度传感器。

②利用蒸发导致湿球温度下降的原理制成的干湿球式湿度传感器。

③利用某些材料具有因不同湿度阻抗或电容变化的原理制成的湿度传感器。

④利用空气的不同绝对湿度而引起热传导率变化的原理制成的湿度传感器。

⑤利用因空气的不同含水量导致红外线及微波衰减程度发生变化的原理制成的湿度传感器。

在机电一体化领域，通常选用容易实现电量转换的湿度传感器。

解　释

绝对湿度

绝对湿度

相对湿度

湿度有绝对湿度及相对湿度两种表示方法。绝对湿度是用 $1m^3$ 空气中所含水蒸气的质量来表示湿度。假设标准大气压为 P_0(Pa)、水蒸气压为 e(Pa)、温度为 t(℃)，则绝对湿度 H(g/m³)可由下式求出：

$$H=\frac{804}{1+0.00366}\cdot\frac{e}{P_0}\ (g/m^3)$$

绝对湿度传感器

绝对湿度传感器是一种利用热敏电阻在干燥空气与潮湿空气中的热传导率的差异实现湿度测量的传感器，其结构如图 4.63 所示。

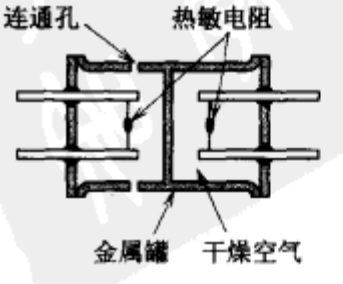


图 4.63　热敏电阻式绝对湿度结构

相对湿度

相对湿度
水蒸气压
饱和水蒸气压

相对湿度是采用气体中的**水蒸气压**与该气体在同一温度下的**饱和水蒸气压**之比来表示湿度。假设气体中的水蒸气压为 e，该气体在同一温度下的饱和水蒸气压为 P_S，则相对湿度 H_R(%RH)可由下式求出。

$$H_R=\frac{e}{P_S}\times 100\ (\%\mathrm{RH})$$

陶瓷吸湿材料
高分子薄膜吸湿材料

在相对湿度传感器中，有采用**陶瓷吸湿材料**制成的阻抗变换型，也有采用**高分子薄膜吸湿材料**制成的阻抗变换型，还有电容变换型等多种类型的湿度传感器。在日常生活中使用的湿度是指相对湿度，通常所说的湿度也大多是指相对湿度。

通常，阻抗变换型湿度传感器的感湿特性会随相对湿度的变化，阻抗呈指数关系变化，同时它还会受温度变化的影响。因此，在实际应用时，需要对测量数据进行对数变换(压缩)，并对传感器进行温度补偿。最近出现了兼有温度补偿及对测量数据进行对数变换功能的组合型湿度传感器。

相对湿度阻抗变换式湿度传感器

图 4.64 所示为**相对湿度阻抗变换式湿度传感器**的外形，图 4.65 所示为其特性曲线，图 4.66 所示为采用这种传感器构成的相对湿度测量电路。



图 4.64 阻抗转换式湿度传感器外形

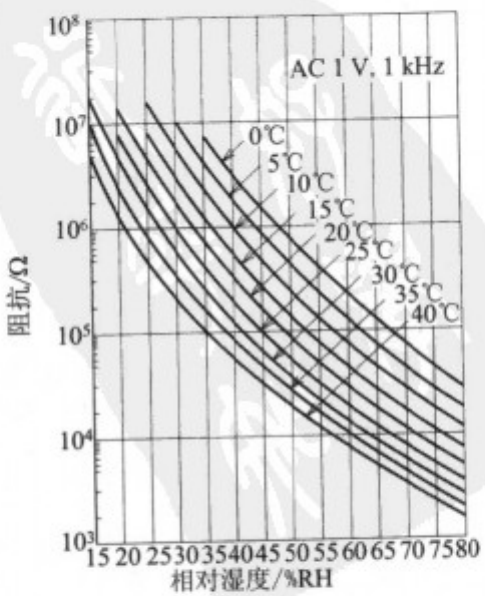


图 4.65 阻抗转换式湿度传感器的特性曲线

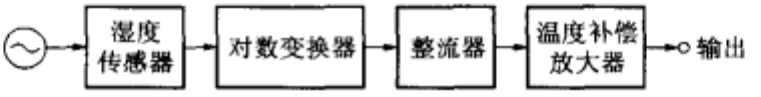


图 4.66　阻抗转换式湿度传感器的电路组成框图

相关知识

◆ 相对湿度的单位

在相对湿度单位中使用(%RH)符号,%后面的 RH 表示相对湿度(Relative Humidity)。

题外话

湿度传感器的应用

湿度传感器多用于楼宇空调、家用空调、加湿器、除湿器、干燥器、微波炉,以及需要对湿度进行控制的工厂等。

11 气敏传感器

要 点

气体的种类有很多，其检测及测量的方法也有许多种。需要检测、测量的气体主要有易燃性气体、氧气、有毒性气体等。

解 释

接触燃烧式气敏传感器

接触燃烧式气敏传感器

接触燃烧式气敏传感器是一种用于检测易燃性气体的传感器。它利用易燃性气体在与氧气发生反应时产生的反应热加热金属，再通过捕捉金属因受热引起的阻值变化来测量**气体浓度**。如图 4.67 所示，这种传感器采用铂等材料作催化剂，使被测气体更易于与氧发生反应，催化剂是在加热及测量用的铂线圈周围掺入氧化铝等载体烧结而成的承载式结构。

气体浓度

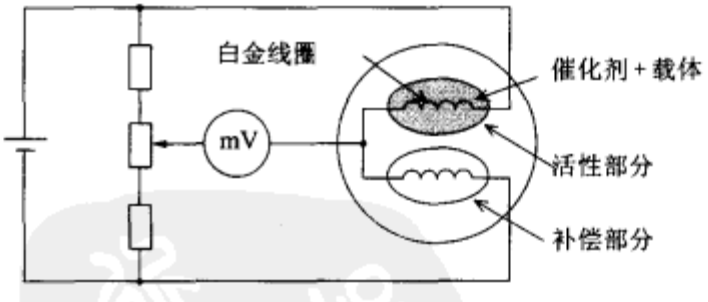


图 4.67 接触燃烧式气敏传感器及检测电路示例

固体电解质氧气传感器

固体电解质氧气传感器

固体电解质氧气传感器是一种采用电极夹住稳定的多孔氧化锆作固体电解质构成的气体传感器。在高温状态下，当两个电极之间存在氧气压差时，就会使电极发生化学反应而产生一个电动势。若已知一侧的**氧气压力**，根据产生的电动势，就可以计算出另一侧的氧气气压，进而检测出**氧气浓度**。图 4.68 所示为汽车空燃比控制用氧气传感器的原理。

氧气压力

氧气浓度

半导体气敏传感器

半导体气敏传感器电导率的变化

在**半导体气敏传感器**中，多数是采用金属氧化物半导体材料，通过测量因其表面吸附气体导致材料**电导率的变化**，来检测气体的浓度。通常的半导体气敏传感器可以与多种气体发生反应，因此可以对多种气体进行检测；但这种半导体气敏传感器并不适于检测某种特定的气体。若在元件制造时采用适当控制烧结温度、向半导体内掺入添加物及改变使用时的加热温度等措施，通过多种方法组合，就可以制成能够检测特定气体的半导体气敏传感器。其结构如图 4.69 所示。

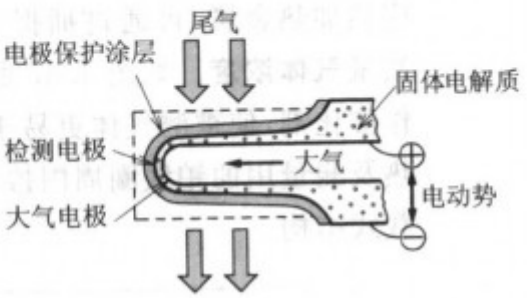


图 4.68　汽车空燃比控制用氧气传感器的原理

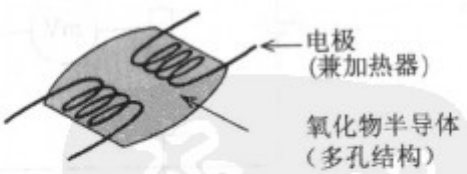


图 4.69　半导体气敏传感器的结构示例

相关知识

◆ 气敏传感器的检测方式

气敏传感器的检测方式有热传导式、固定电位电解式、原电池式等多种。在表示气体浓度时，经常使用 ppm(parts per million)这种符号，它表示 10^{-6}(气体容积比)。

篇外话

气敏传感器的应用

接触燃烧式气敏传感器及半导体气敏传感器，主要用于气体泄漏报警器。此外，如图 4.70 所示，固体电解质氧气传感器则多用于汽车发动机的空燃比（发动机吸入的混合气体中“空气/燃料”的质量比）控制。空燃比控制是为净化汽车尾气使三元催化剂发挥最佳净化性能，并使之趋近理论值的一种反馈式控制。

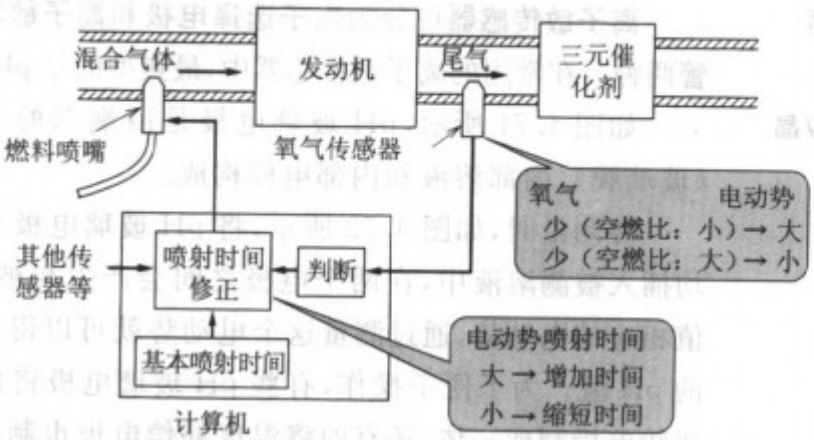


图 4.70 空燃比控制系统化学传感器

12 化学传感器

要 点

化学传感器是一种用于识别特定化学物质，并将其含量或浓度转换成电量的传感器。化学传感器中有离子敏传感器、生物传感器等多种。

解 释

离子敏传感器

离子选择电极

离子敏场效应晶体管

pH 玻璃电极

离子敏传感器

离子敏传感器可分为**离子选择电极**和**离子敏场效应晶体管**两种。在常用的离子敏传感器中，最典型的是 **pH 玻璃电极**。

如图 4.71 所示，pH 玻璃电极是由端部的 pH 感应膜（玻璃膜）、内部溶液和内部电极构成。

在测量时，如图 4.72 所示，将 pH 玻璃电极与比较电极均插入被测溶液中，在两个电极之间会产生与被测溶液 pH 值相应的电动势，通过测量这个电动势就可以得出被测溶液的 pH 值。为了便于操作，有些 pH 玻璃电极将内部电极与比较电极制成一体，还有的将温度补偿电极也制成一体构成复合型电极。pH 玻璃电极在 JIS Z 8850 项中有标准规定。

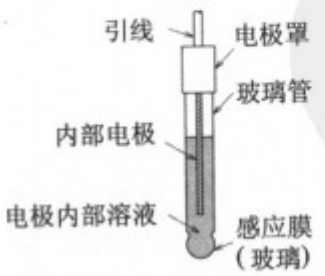


图 4.71 pH 玻璃电极

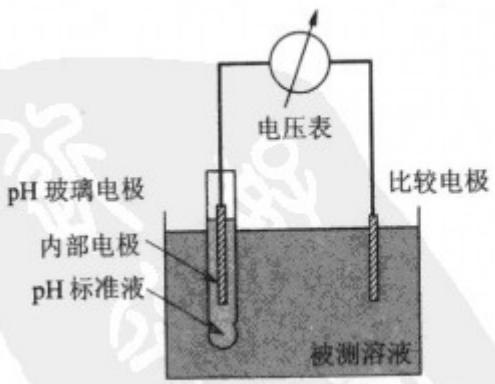


图 4.72 pH 值检测原理

离子敏场效应晶体管（ISFET：Ion Sensitive Field Effect Transistor）是一种在场效应晶体管绝缘栅膜上形成离子感应膜制成的传感器。它在感测原理上与离子选择电极相同，但由于采用半导体技术可以制成超小型的传感器，因此，这种传感器将来会在各种领域得到广泛的应用。

生物传感器

生物传感器

如图 4.73 所示，**生物传感器**是一种利用某些生物分子所具有的特定分子识别能力，而将待分析分子的含量转换成其他物理量后进行测量的传感器。通过组合采用具有识别特定分子能力的不同生物分子作敏感材料及不同的信号转换方法，可以制成能检测各种特定分子的传感器。在采用酶作敏感材料制成的**酶传感器**中，**酶电极**已经可以测量氨基酸、糖、核酸等多种物质。

酶传感器

酶电极

免疫传感器

微生物传感器

此外，利用抗体及微生物作敏感材料制成的**免疫传感器**及**微生物传感器**也处于研究与开发之中。

除此之外，作为化学传感器用于检测识别气味及味道是很复杂且困难的，**气味传感器**及**味觉传感器**也处于研究开发之中。

气味传感器

味觉传感器

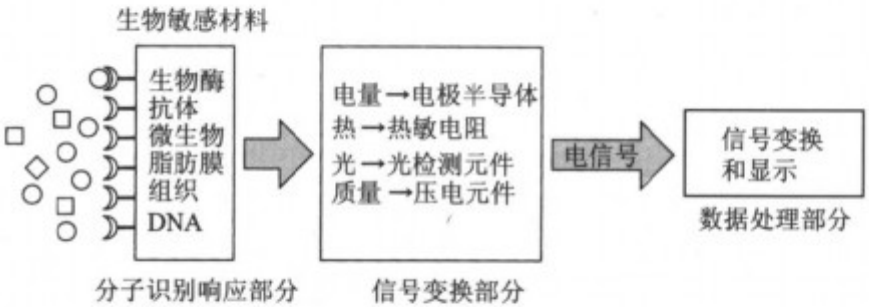


图 4.73 生物传感器

相关知识

◆ 氢离子浓度指标(pH 值)

pH 值是一种表示液体中氢离子浓度的指标，通常用来表示溶液的酸碱程度。

pH 值小于 7 时溶液呈酸性，等于 7 时溶液呈中性，pH 值在 7～14 之间的溶液呈碱性。

题外话

化学传感器的应用

在化学、生物酶产业的工艺管理及血液的pH值测量、锅炉与环境水监测等方面，经常采用pH玻璃电极；在食盐浓度计量及体液电解质分析等方面，经常采用钠玻璃电极。此外，生物传感器也在临床检查、食品发酵业的工艺管理等方面有所应用。

13 语音识别

要 点

在机电一体化领域中，语音识别技术是当今备受瞩目的技术之一。若能通过语音识别技术实现用声音完成各种控制，就可以将双手解放出来，从而可以使人们在做其他工作的同时完成各种控制，数据输入也会变得非常简单。除此之外，通过语音识别技术还能够实现真正意义上的人与计算机及机器人的对话。

解 释

语音识别的方法

若能正确识别构成语音的各个音节，就可以识别任何语句。然而，在日常生活中人们说话的语音相当复杂，准确区别说话中的各个音节十分困难，当人们快速说话时，各音节之间是处于与其他音节相似的状态。现在，**语音识别**的基本方法是先将各标准的**单词音波**形存储起来，再将待识别(输入)的语音波形与已存储的语音波形进行选配识别。这种识别方式，称为**单词音波形选配方式**。其处理过程如图 4.74 所示。

语音识别

单词音波

单词音波形选配方式



图 4.74 语音识别的基本结构框图

语音波形

识别输入的语音通常有两种方式，即**特定说话人方式**和**非特定说话人方式**。特定说话人方式的识别率比较高。为了便于存储标准语音波形及选配语音波形，需要对输入的语音波形频带进行适当的分割，将每个采样周期内各频带的语音特征能量提取出来，如图 4.75 所示。语音波形的选配方式有多种，但由于说话人的语速不可能一直不变，因

特定说话人方式

非特定说话人方式

此，在与标准语音波形进行选配比较时，需要将输入的语音数据按时间轴作扩展或压缩处理。这种操作可通过计算各波形间的距离（表示相似程度）来实现，称其为 **DP**（Dynamic Programming，动态编程）**选配**，这也是语音识别中的基本选配方法。它是从多个与标准语音波形比较的计算结果中，选择波形间距离最小的作为识别结果。在这一过程中，需要进行大量的数据运算。随着 LSI 技术的不断进步，现在几乎所有的语音识别电路都是由一片或几片专用的 LSI 构成。为了能更快、更准确地识别连续语音，在硬件上通常采用能实现高速数字信号处理的 **DSP**（Digital Signal Processing，数字信号处理器）芯片、在软件上对选配算法进行改进以及采用其他的语音识别方式等方法都处于研究开发之中。

DP 选配

DSP

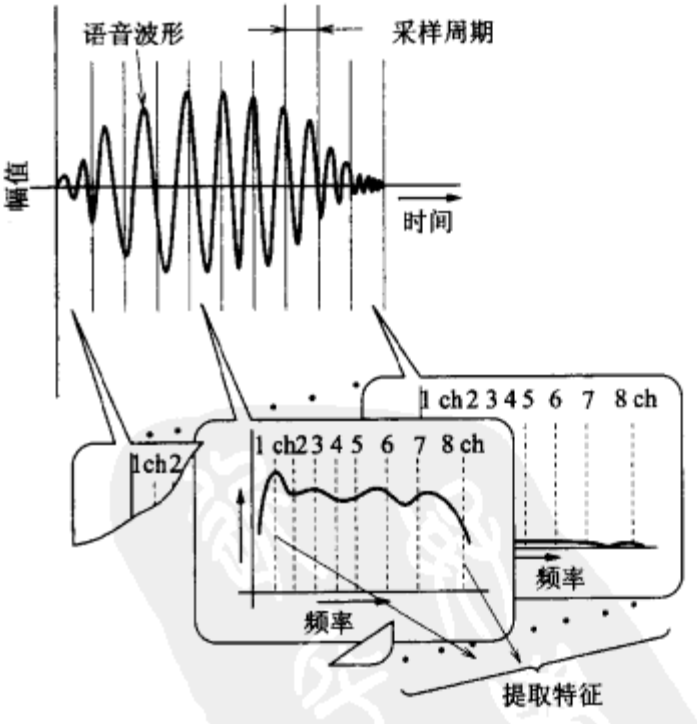


图 4.75　语音分析与特征的提取

相关知识

◆ 语音合成

现在关于语音的研究，不仅在语音识别方面而且在语音合成方面也取得了相当大的进展，运用语音合成技术的各种设备已进入到人们的日常生活中。

随着近年来个人计算机多媒体化的深入，与声音相关的设备及软件也被大量地引入。已出现了很多利用这些系统进行语音识别及语音合成用的软件，利用这些软件，可以轻松地实现语音控制（语音识别）和文本数据的语音输出（语音合成）等。

14　智能传感器

要　点

能将来自传感器的信息，通过处理器进行分析和处理的过程称为传感器的智能化。智能化的传感器也称为智能传感器或超级传感器。

解　释

智能传感器

现在传感器技术的发展异常迅速，已经研究或开发出了多种性能优异的传感器。然而，对于要求更高的检测与识别，不仅要求传感器的灵敏度高，还要求传感器自身要具有一定的**信息处理**能力。

信息处理

如图 4.76 所示，若将一个或多个传感器通过采用内嵌微处理器等措施实现**离散化处理**，就能够大幅度地提高信息处理的速度和可靠性。因此，现代的传感器自身应具有**自动校正**和**自动补偿功能**，使传感器对环境变化具有自动适应和判断的能力，通过传感器对自身的数据处理（剔除异常或例外值），仅输出有用的信息。这样，通过快速分析来自多个此类传感器的信息，就能够实现一些高级的识别和判断。

离散化处理

自动校正

自动补偿功能

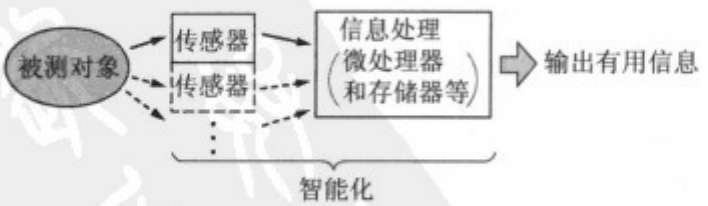


图 4.76　传感器的智能化

仿生传感器

人类五官的功能非常出色，每种感官都具有相当强的识别能力。因此，在传感器领域，也在进行能**模仿人类五官**功能的传感器的研究与开发。

模仿人类五官

在气味的检测和识别方面，如果分析一下人类的**嗅觉功能**，就会知道人类是通过嗅觉细胞吸附气味分子，将化学刺激转换成电信号来感知气味。通常，在嗅觉细胞中，多数

嗅觉功能

细胞能够分辨多种气味，仅能分辨一种气味的细胞很少。一般认为，人类对于某一气味的嗅觉，是通过并行感受多个嗅觉细胞不同的反应强度，综合各细胞输出的波形进行识别。在模仿人类的这种嗅觉原理制成的**嗅觉传感器**中，正在进行**智能化气敏传感器**的开发。

嗅觉传感器
智能化气敏传感器
半导体气敏传感器

图 4.77 是利用由两种响应特性不同的器件构成的**半导体气敏传感器**，在某种程度上已能对芳香剂、咖啡、烟草、氨等进行识别。此外，通过对六种半导体气敏传感器数据的综合分析，将各传感器的数据按图 4.78 所示进行图形化处理，根据图形的形状，就可以轻松地区分气味的好与坏。

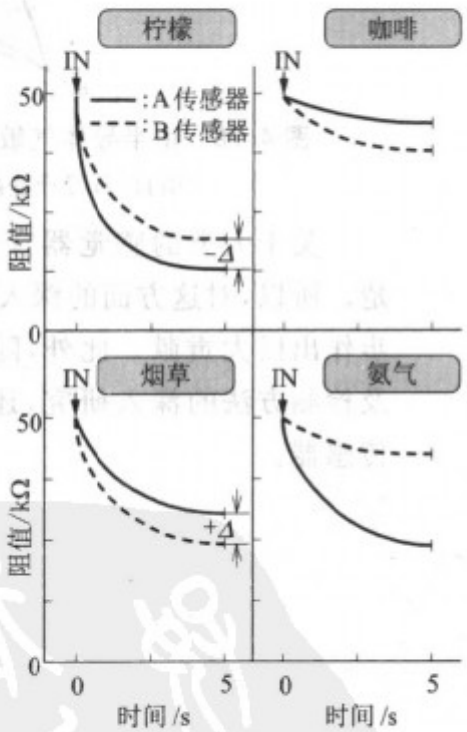


图 4.77 两种不同传感器对不同物质的输出阻值变化

（引自《传感器技术》，Vol. 13，No. 3，p. 71(1993)野村健次）

视觉
图像信息
视觉智能传感器

在**视觉**方面也是一样，人们正在考虑采用与人眼原理相同、能将大量的**图像信息**压缩成有用信息后输出的传感器、连同所用的微处理器一起制成一种**视觉智能传感器**。

模仿人类其他感官的传感器也不是简单的传感器，同样都是通过几个传感器组合并对这些传感器的信息进行可靠处理，才可能实现识别功能。智能传感器对于高级检测和识别处理是有效并且必要的。

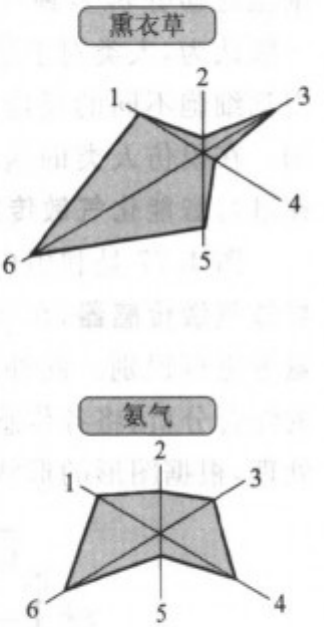


图 4.78　由半导体气敏传感器检测出的物质气味形状

（引自《日经产业新闻》，2003 年 4 月 7 日）

关于人类的感觉器官，还有相当一部分的机理尚不清楚。所以，对这方面的深入研究，必将会对传感器技术的进步作出巨大贡献。此外，随着对人类所不具有的感知功能及检测方法的深入研究，还将出现许多其他形式的智能化传感器。

第5章

执行装置技术

●责任编委
樱井　诚
中田信明

●执　　笔
浅野健一(1~15)
中田信明(16~21)

机电一体化产品是采用微型计算机控制的智能化机械。诸如物体搬运、紧固螺栓之类的工作最终都将由智能化的机械来完成。用来承担动力和运动转换的装置称为执行装置。

执行装置的种类较多，有大功率的，也有快速运动的，还有能够准确控制的等等。

本章将主要阐述电动机、液压和气动等执行装置的结构、工作原理及其特性等。书中引用了大量的实用电路和插图，一些重要的名词术语以黑体字书写，以便读者进一步深入学习。

1　执行装置

要　点

所谓执行装置(actuator)，是指把从动力源获得的能量变换成机械能，使机械工作的一种装置，相当于人体的肌肉部分。常用的装置有以电动机为代表的电动执行装置和以液压、气动为代表的机械执行装置。

解　释

机电一体化技术与执行装置

执行装置

所谓**执行装置**，就是把电源、液压泵、气压泵等动力源(power source)的能量变换成旋转运动或者直线运动的机械能，是使机械工作的一种装置。现代计算机技术、电子技术和**伺服装置**的组合，使机械系统的高精度和快速控制已经成为现实，其中最具代表性的是机器人和数控机床。

伺服装置

执行装置的种类

人们根据控制对象的不同，将执行装置分为很多种。机电一体化技术中常用的有以下几种。

电动机　电动机常简称为电机。它可分为做旋转运动的**旋转电机**和做直线运动的**直线电机**。

旋转电机

直线电机

电机的种类很多，如图5.1所示。机电一体化技术常用的电机有**直流电机**、**交流电机**和**步进电机**等。

直流电机

交流电机

步进电机

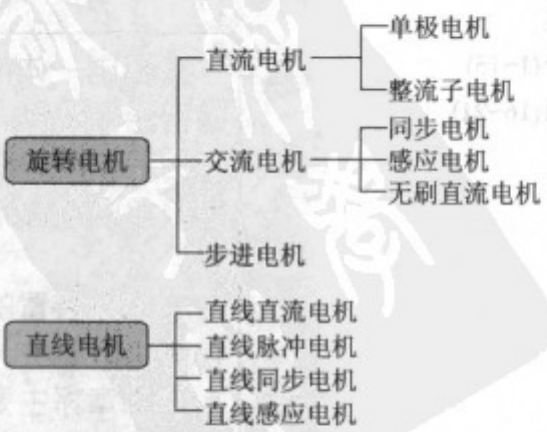


图5.1　电机的分类

螺线管(solenoid)　在线圈中放入可动铁心，当线圈中

流过电流时，可动铁心便受力移动，构成做直线运动的传动装置。由于在结构上螺线管的可动铁心只能移动微小的行程，因此，它只适用于小型、快速响应的场合，通常应用于液压系统和气动系统的电磁阀控制和汽车燃料喷射阀的控制等。根据所用电源的不同，可将其划分为 AC（交流）**螺线管**和 DC（直流）**螺线管**两种。

行程

AC 螺线管

DC 螺线管

液压执行装置 液压执行装置是一种以液压作为动力源的执行装置，有**液压缸**和**液压马达**等，这是一种体积小、输出功率大的执行装置。

液压缸

液压马达

气动执行装置 气动执行装置是一种以压缩空气作为动力源的执行装置，有**汽缸**和**气压马达**等，这是一种体积小、质量轻的执行装置。

汽缸 气压马达

相关知识

◆ 伺服装置

为了区别于单纯动力输出的执行装置，控制用的执行装置一般称为伺服装置。与动力用执行装置相比较，设计伺服装置时应以以下功能为重点。

① 转速和转矩调节范围要宽。

② 能承受频繁的加速、减速运行和正转、反转运行。

③ 具有快速响应特性。

◆ 电动推杆

电动推杆（cylinoid）的形状与液压缸或气压缸的形状相同，均是采用电动机和减速器来实现直线运动的直动执行装置。由于电气传动不需要压缩机和储气罐等附加设备，并且推力和速度控制性能良好，因此在很多场合下，常用电动推杆来代替传统的液压、气压执行装置。在以下场合可以考虑应用电动推杆。

① 代替汽缸、液压缸：电动化、节省空间、费用低。

② 代替螺线管：轻量化、节省空间、费用低。

③ 通用机械：机器人、家电产品、运输机械、控制机械。

④ 相扑机器人的手臂伸缩用的执行机构等。

题外话

执行装置的展望

近年来，根据新的驱动原理开发出一系列新型执行装置，其中最具有代表性的是静电执行装置（electrostatic actuator）、形状记忆合金执行装置（shape memory alloy actuator）、压电执行装置（piezo electric actuator）等。这些新型执行装置将得到广泛的应用。

2 步进电机

要 点

步进电机(stepping motor)是一种将输入脉冲信号转换成相应角位移的旋转电机,可以实现高精度的角度控制。由于可以用数字信号直接进行控制,因此很容易与微型计算机相连接,是位置控制中不可缺少的执行装置。

解 释

步进电机

反馈控制

步进电机的特点

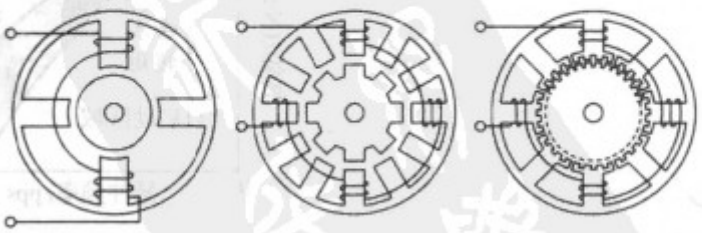
表 5.1 中给出了**步进电机**的特点。这种电机的最大优点是不需要**反馈控制**。

表 5.1 步进电机的特点

优 点	缺 点
· 不需要反馈控制,电路简单 · 容易与微型计算机相连接 · 停止时有保持转矩 · 维护方便	· 效率低 · 容易引起失步 · 有时产生振荡现象

步进电机的工作原理与分类

根据产生转矩的方式不同,将步进电机分为 VR 型、PM 型和 HB(混合)型等几种。其分类与结构见图 5.2。



(a) PM 型　(b) VR 型　(c) HB 型

图 5.2 步进电机的结构与分类

PM(Permanent Magnet)型 转子为圆筒形永磁钢,定子位于转子的外侧。定子线圈中流过电流时产生定子磁场。定子和转子磁场间相互作用,产生吸引力或排斥力从而使转子旋转。步距角为 90°或 45°。

VR(Variable Reluctance)型 转子由齿轮状的低碳钢构

成。转子在通电相定子磁场的作用下，旋转到磁阻为最小的位置。通常使用的步距角为0.9°、1.8°及3.6°等。

HB(HyBrid)型　它是VR型和PM型的复合型步进电机，能获得与VR型相同的很小的步距角。因具有较大转矩而得到广泛应用。

步进电机的转矩特性

脉冲频率

步进电机的**脉冲频率**与其产生的转矩之间的关系称为步进电机的转矩特性，如图5.3所示。**牵入**(pull-in torque)**转矩**也称为**启动转矩**，是使处于静止状态的步进电机突然启动，并能够以一定转速旋转的**负载转矩**的限值。牵入转矩以内的区域称为**自启动区域**。

牵入转矩
启动转矩
负载转矩
自启动区域

如图5.3所示，在步进电机的转矩特性自启动区域以外，当保持输入脉冲的频率一定而逐渐增大负载转矩时，或保持负载转矩一定而使输入脉冲的频率逐渐提高时，将能够跟踪负载的转矩限值称为**牵出转矩**(pull-out torque)。另外，步进电机停止时的转矩称为**保持转矩**(holding torque)，这也是步进电机所能产生的最大转矩。

牵出转矩
保持转矩

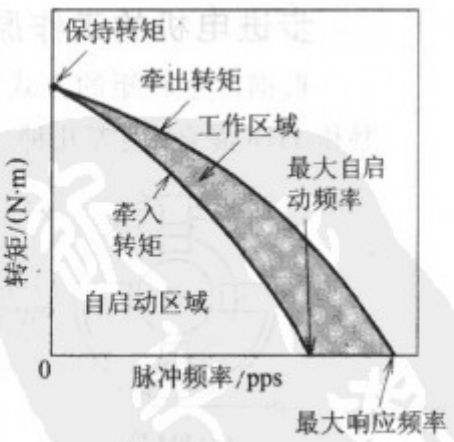


图5.3　步进电机的转矩特性

相关知识

◆ 步进电机的名称

由于步进电机按照输入的脉冲信号做步进式运动，故称为步进电机，也可称为脉冲电机。

3　步进电机的励磁方式

要　点

2相步进电机的励磁方式有单相励磁、双相励磁和单-双相励磁。5相步进电机的励磁方式有标准接线的4相励磁和五角形接线的4相励磁等。应根据控制对象适当选择不同的励磁方式。

解　释

2相步进电机的励磁方式

角度精度高
衰减振荡　失步

单相励磁方式　如图5.4(a)所示。这是一种通常在定子线圈的一相中流有电流的方式，因此，每一步相对应的**角度精度高**，消耗的电流也较小。但是，旋转时有较大的**衰减振荡**，容易引起**"失步"**现象。

双相励磁方式　如图5.4(b)所示。这种励磁方式通常是两相线圈中通有电流，其输出转矩约为单相励磁时的两倍，并且衰减振荡较小，可以有较宽范围的脉冲频率响应，因此广泛应用于一般性的场合。

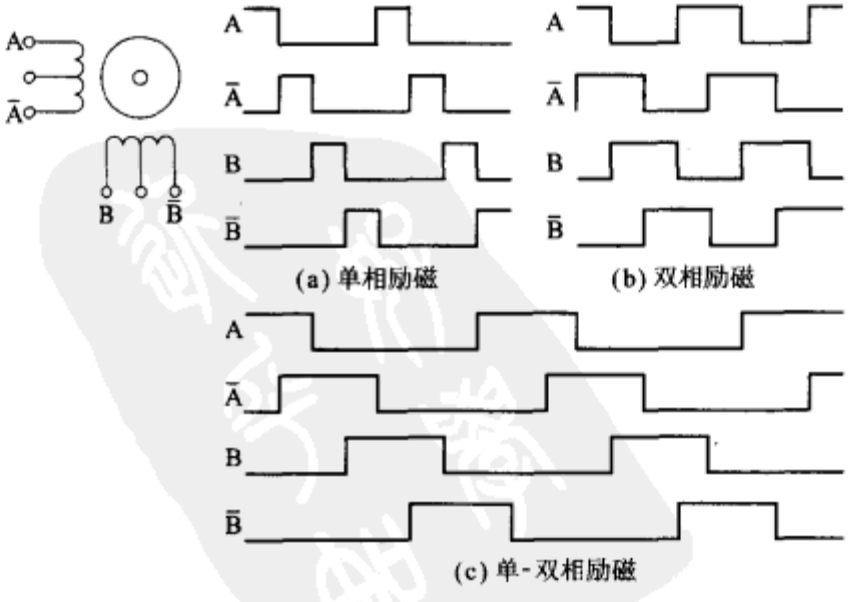


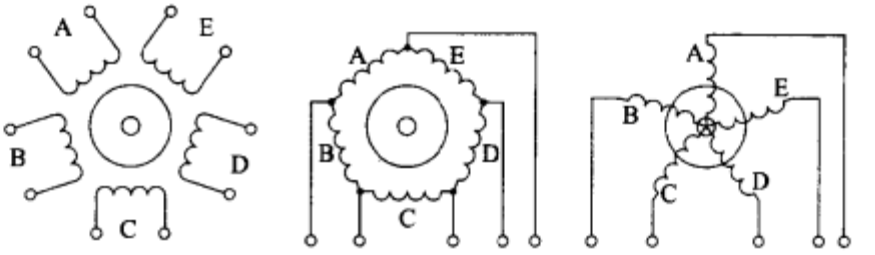
图5.4　2相步进电机的励磁方式和驱动程序

单-双相励磁方式　如图5.4(c)所示，这是一种单相励磁和双相励磁交互切换的励磁方式。由于步距角为单相励磁和双相励磁的1/2，因此能够进行微细的位置控制。

5 相步进电机的励磁方式

标准接线
五角形接线
星形接接线

5 相步进电机的接线方式有**标准接线**、**五角形接线**和**星形接线**，如图 5.5 所示。



(a) 标准接线　(b) 五角形接线　(c) 星形接线

图 5.5　5 相步进电机的接线方式

标准接线的 4 相励磁方式　图 5.6(a)是标准接线电机的 4 相励磁方式，它使用**双极驱动电路**。

双极驱动电路

五角形接线的 4 相励磁方式　图 5.6(b)是五角形接线的电机的 4 相励磁方式，使用双极驱动电路。功率晶体管的数是标准接线方式的 1/2。

星形接线的 2-3 相励磁方式　图 5.6(c)是星形接线的电机 2-3 相励磁交替进行的方式，使用**单极驱动电路**。功率晶体管的数是标准接线方式的 1/4。

单极驱动电路



(a) 标准接线的 4 相励磁方式　(b) 五角形接线的 4 相励磁方式　(c) 星形接线的 2-3 相励磁方式

图 5.6　5 相步进电机的励磁方式

相关知识

◆ 产生励磁脉冲 IC 芯片的使用

利用软件产生励磁脉冲使步进电机旋转时，微型计算机的负担较大。为减轻计算机的负担，可以使用产生励磁脉冲的 IC 或在微型计算机内部安装定时器等办法来解决(参见 5.6 节)。

4 步进电机驱动电路

要 点

根据电流在线圈中流动的方向不同，步进电机的驱动电路可分为单极型驱动方式和双极型驱动方式两类。单极型驱动方式为标准驱动方式，电路构成较为简单；双极型驱动方式与单极型驱动方式相比，可以产生2倍的转矩，但驱动电路比较复杂。应根据控制对象的不同，适当选择不同的驱动方式。

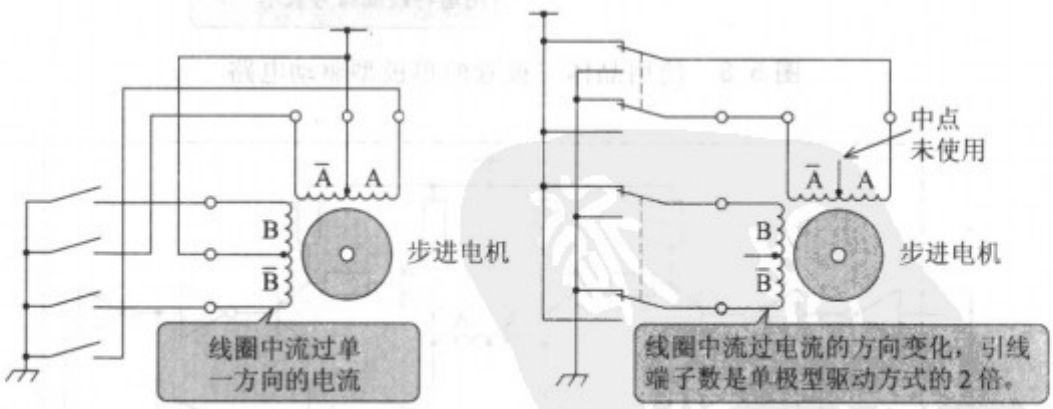
解 释

步进电机驱动电路的构成方法

下面以图5.7所示的4相步进电机为例，考察一下驱动电路的构成方法。步进电机驱动电路的构成是由电机的相数来决定的。与步进电机的形式(PM型、VR型、HB型等)无关。定子线圈产生正转磁场或者反转磁场的方式有两种，一种为**单极型**(uni-polar)**驱动方式**，另一种为**双极型**(bi-polar)**驱动方式**。

单极型驱动方式

双极型驱动方式



(a) 单极型驱动　　(b) 双极型驱动

图5.7 4相步进电机的驱动方式

① 单极型驱动方式。定子线圈中流过电流进行磁场切换时，线圈的中点与两端点之间，无论哪一边都只流过一个方向的电流。

② 双极型驱动方式。定子线圈的中点不接线。定子线圈中流过电流进行磁场切换时，线圈两端所加电压作正、负

切换，从而使线圈中电流方向改变。与单极型驱动方式相比，可以产生2倍的转矩，因此电机效率较高。但是正如图5.7中所示的那样，其引线端子数是单极型驱动方式的2倍，电路较为复杂。

步进电机驱动用开关电路实例

大功率晶体管
功率 MOSFET

为了把励磁信号变换成步进电机中随信号变化的励磁电流，要使用**大功率晶体管**或**功率 MOSFET**作为切换开关。

图5.8所示为使用大功率晶体管的单极型驱动方式的电路示例。图5.9所示为双极型驱动方式的电路示例。

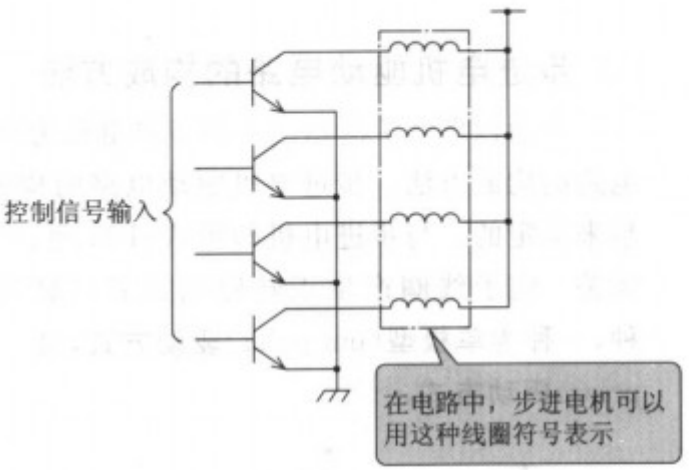


图5.8　使用晶体三极管的单极型驱动电路

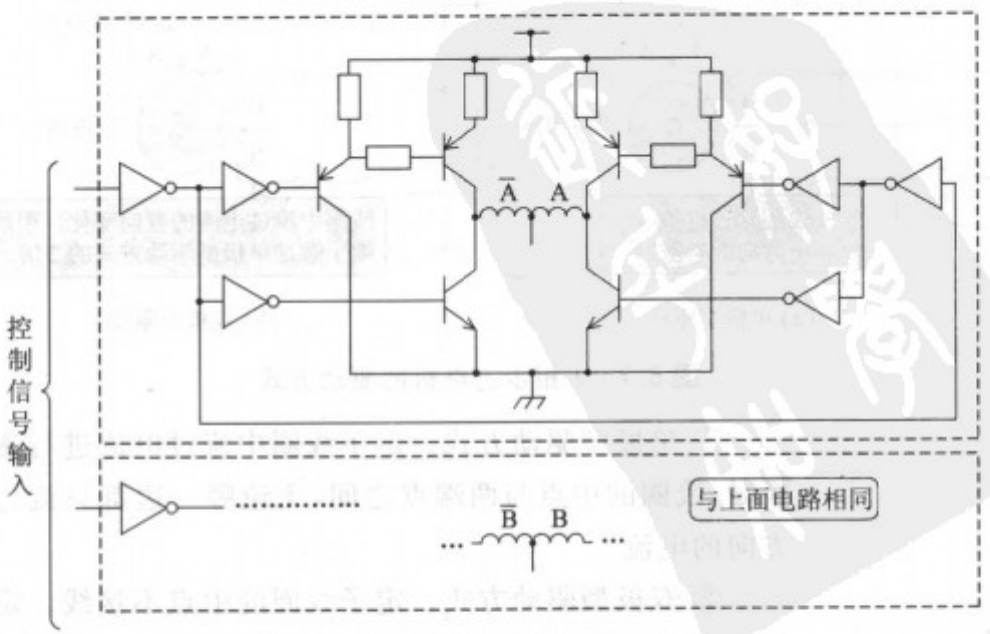


图5.9　使用晶体三极管的双极型驱动电路

相关知识

◆ **用步进电机获得大输出转矩的方法**

为了获得大输出转矩，可以采用 PM 型步进电机及双向驱动和双相励磁方式等。这就不必像直流电机那样采用齿轮减速装置，也同样能直接获得大的输出转矩。

◆ **功率 MOSFET**

目前，在市场上很容易买到用 4V 信号驱动的功率 MOSFET，因此，与微型计算机及其接口电路的连接也变得很简单。另外，从效率上看，与大功率晶体管相比，使用功率 MOSFET 也是有利的。

题外话

使用步进电机的相扑机器人(自律型)

与直流电机相比，步进电机的效率较低，但是通过计算机对步进电机进行位置和速度控制就变得简单了。把步进电机应用于学习用微机控制机器人时学习效果将很快提高，也非常有趣。作为例子，来看一看步进电机在相扑机器人中的应用。

由于步进电机在低转速时的转矩较大，可以应用于相扑机器人的脚轮驱动。采用直流电机驱动时，必须使用齿轮减速箱，而脚轮与步进电机轴可以直接连接，使结构、制作较为简单。

将四台软磁盘驱动器用的步进电机用于四轮驱动机器人效果最好。为了获得较大的转矩，可采用双向驱动电路和双相励磁方式等。

采用直流电机时，为了使转速下降，需要减小电机的电流，这时电机的转矩变小，而步进电机在低速时转矩大。当相扑对战双方处于互相推的状态时，即使脚轮不转动，也可以产生很大的转矩。这一点与直流电机采用减速齿轮来获得大转矩的效果是一样的。

目前，在质量相同的情况下，由于步进电机的功率尚不及直流电机，因此采用步进电机的相扑机器人尚无晋级横纲的机会，仅适合于作为相扑机器人入门之用。

5　步进电机控制电路例

要　点

为了理解步进电机的基本工作原理，这里先不使用微型计算机而采用通用逻辑电路来构成控制电路以便于讲解。将这个电路制在试验电路板上，用示波器来观察波形，以便提高学习效果。

解　释

步进电机驱动电路的构成

为了理解步进电机的动作，在不使用微型计算机的情况下，看一下电机的正、反转控制和转速控制的实验电路。

一般说来，步进电机的驱动电路如图 5.10 所示。信号发生电路可以采用单独的振荡器，也可使用微型计算机。

脉冲分配电路

脉冲分配电路则是把来自信号发生电路的驱动脉冲自动地按照 4 相步进电机的**励磁模式**进行分配的电路。功率放大器一般由**大功率晶体管**或**功率 MOSFET** 构成，用来提供电机线圈中所需的电流。

励磁模式

大功率晶体管

功率 MOSFET

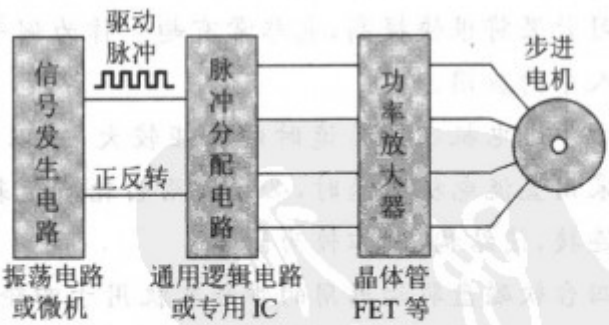


图 5.10　步进电机驱动电路的构成

使用通用集成逻辑电路的步进电机驱动电路例

图 5.11 所示为采用**通用集成逻辑电路**的步进电机驱动电路。下面是它的工作原理。

通用集成逻辑电路

由振荡器构成信号发生电路　决定步进电机转速的驱动脉冲由函数发生器产生后，加到图 5.11 所示的“驱动脉冲输入”端。也可以采用 555 定时器等专用集成电路构成振荡器。555 定时器可以方便地接成**单稳态触发器**和**多谐振荡器**等状态，常用于脉冲波形的产生、变换、测量与控制，

单稳态触发器

多谐振荡器

此处将其用作多谐振荡器，利用电位器来改变振荡频率，从而调节步进电机的转速。除 555 定时器外，也可以使用通用集成逻辑电路来构成振荡电路。

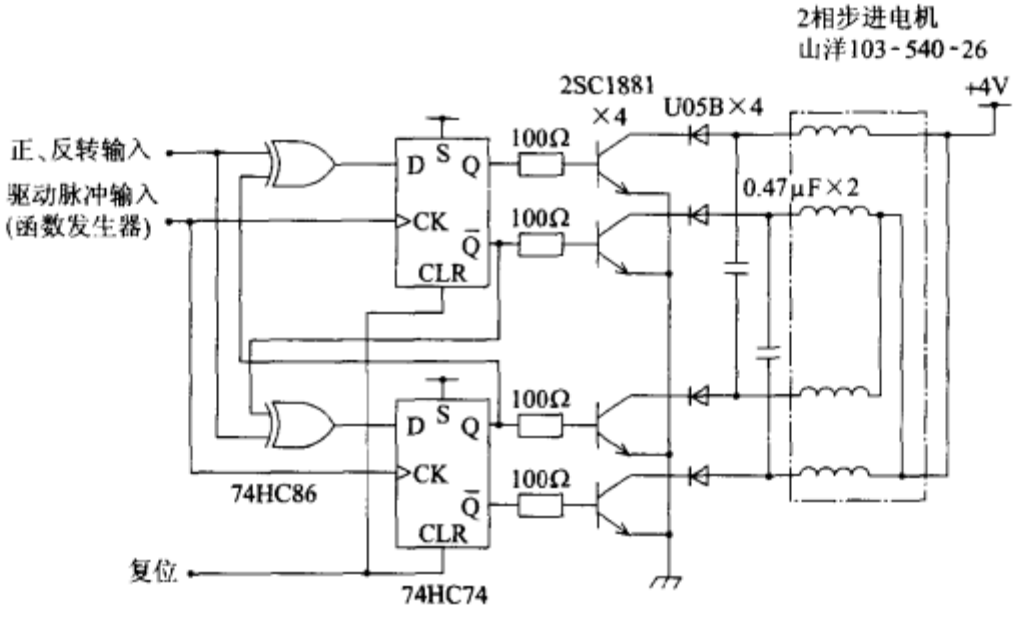


图 5.11　由通用逻辑 IC 构成的步进电机驱动电路

脉冲分配电路　脉冲分配电路由“异或”门 74HC86 及 D 触发器 74HC74 构成。当正、反转输入端子为“1”时电机正转，为“0”时电机反转，由加到驱动脉冲输入端子上的脉冲来控制电机的转速。

功率放大器　它是以大功率晶体管 2SC1881 为中心构成。图 5.11 中电容和二极管的作用是，当大功率晶体管关断时，为了抑制电机线圈的反电动势，电容和二极管作为电气阻尼器工作，从而抑制电机的振荡，并实现快速响应。

相关知识

◆ 微型计算机与步进电机的接口

使用微型计算机可以产生柔性信号，从而能够对机械系统实行柔性控制。在使用微型计算机时，一般通过并行接口电路或定时器/计数器电路与脉冲分配电路连接。当计算机的 CPU 采用 Z80 时，并行接口电路 LSI 常使用 8255PPI 或 Z80PIO；定时器/计数器 LSI 常使用 8253PIT 或 Z80CTC 等。目前广泛使用的是在内部设置有上述接口电路的单片微型计算机。

6　采用步进电机专用IC芯片的控制电路例

要　点

用微型计算机对步进电机进行控制时，使用专用IC芯片产生励磁模式可以减轻微型计算机的负担。在做高速运转时，步进电机采用外部串联电阻法或恒电流法驱动。特别是恒电流法，因运行效率高而应用较多。常用的还有专用集成PWM斩波驱动器等。

解　释

采用专用生成励磁模式IC芯片的控制电路

如5.3节所述，由I/O接口对步进电机进行直接控制时，电路结构简单，但增加了计算机CPU的负担是其不足之处。这对于来自传感器的输入信号和电机输出信号较多的系统，或者要求快速响应的系统就会带来很多问题。这时，采用步进电机专用的**生成励磁模式IC芯片**与计算机**中断控制技术**相结合，CPU就可以获得有效的利用。

生成励磁模式IC芯片

中断控制技术

图5.12所示为由生成励磁模式IC和PMM8713（山洋电气）构成的控制电路实例。电路为单极型驱动方式。这种IC芯片输入为二进制信号，输出为励磁时序脉冲，具有驱动3相或4相步进电机的功能。

图5.12中来自微型计算机的两个信号（正、反转信号和驱动脉冲信号）通过I/O接口送入IC。E_A、E_B为励磁脉冲的切换端子，由模拟开关按动作真值表所示的规律切换励磁脉冲。这是实验电路可以进行的切换，而实际上，在与微型计算机组合控制时，两个端子是固定使用的。接于复位端子的滤波电路是为了保证IC可靠复位而设置的。

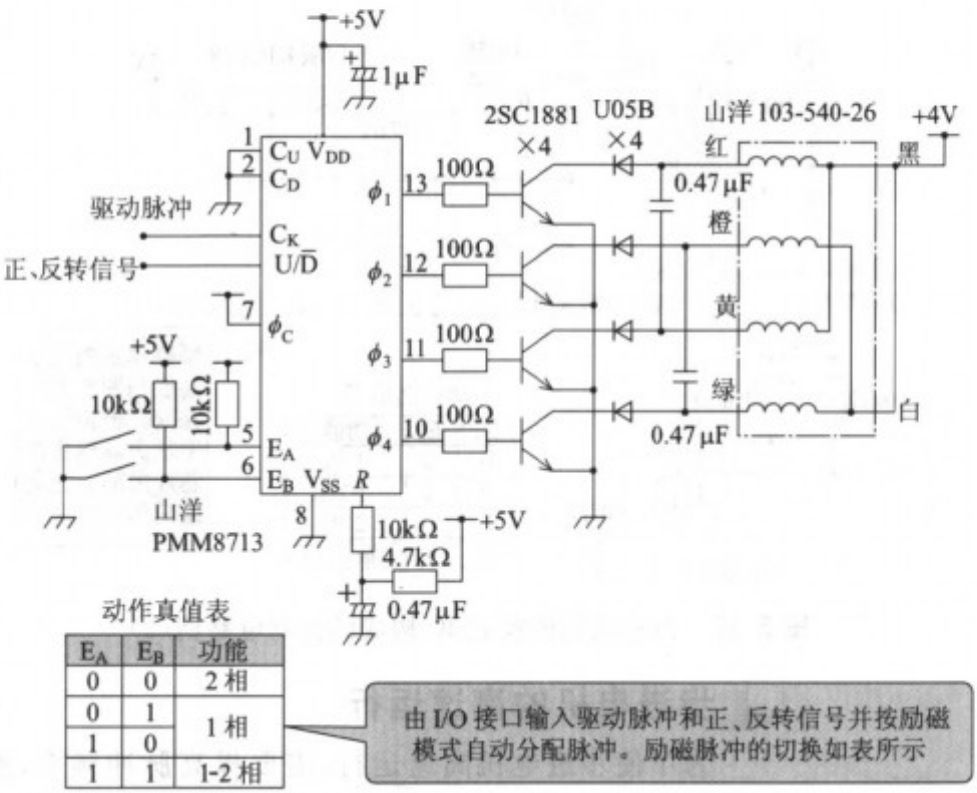
该控制电路的4相步进电机的额定电压为4V，额定相电流为0.6A，步距角为1.8°。常应用于X-Y绘图仪及软磁盘驱动器等。

达林顿连接

相间电容器

大功率晶体管2SC1881的内部为**达林顿连接**，可以使用到3A输出电流。用于步进电机驱动时，应适当选择达林顿晶体管的组合。另外，与电机线圈串联的二极管与**相间电容器**构成电气阻尼器，用于吸收步进电机的振荡并获得

响应特性　　快速**响应特性**。



E_A	E_B	功能
0	0	2 相
0	1	1 相
1	0	
1	1	1-2 相

图 5.12　由生成励磁模式 IC 构成的控制电路例(1)

图 5.13 所示为由 TD62803P(东芝)构成的控制电路例子。这种 IC 芯片可以为 3 相或 4 相步进电机提供励磁模式发生功能。另外在芯片内部设置了最大输出为 400mA 的功率放大电路，使控制电路变得简单，对于小功率步进电机来说使用起来非常方便。电路中的 2 相步进电机额定电压为 5V、额定相电流为 80mA/相、步距角为 1.8°、PM 型的，常应用于与仪器配套用小型打印机等场合。

图 5.13 中，端子“3/4”为 3 相和 4 相步进电机切换用的输入端子，出厂时固定在 4 相步进电机的位置上。应该指出的是，由动作真值表可知，输入端子 E_A、E_B 均为“1”时，电机处于全输出 ON 的测试状态，这一点是需要注意的。输入端子 E 为**输出选通功能端**，图中固定为“1”，但是，由于端子 E 通过 I/O 接口由微型计算机来控制，当步进电机停止时，也可以做到无电流流过。

输出选通功能端

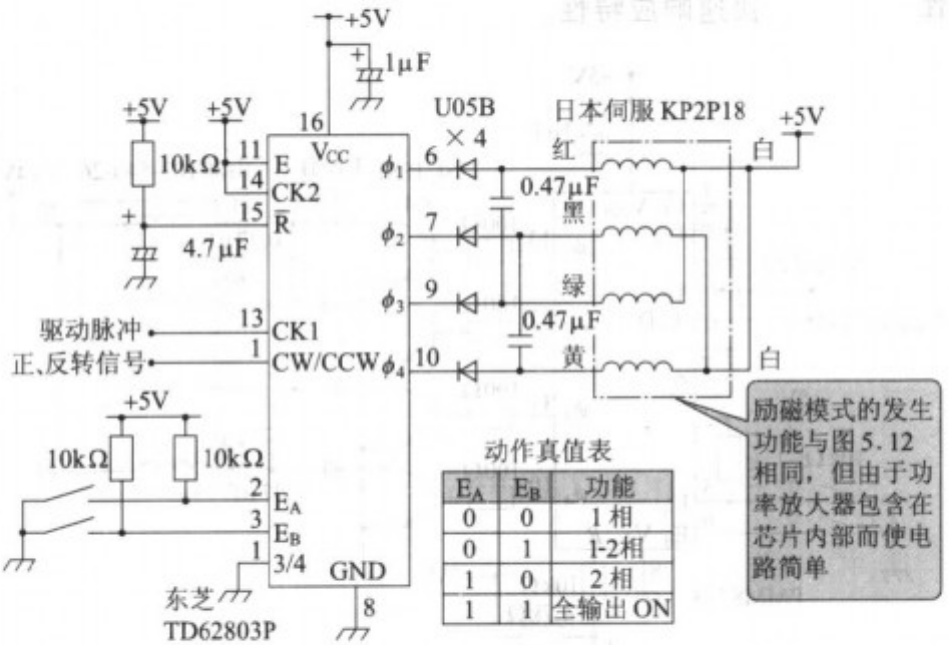


图 5.13 由生成励磁模式 IC 构成的控制电路例(2)

步进电机的高速运行

为了使步进电机高速运行，需要提高脉冲频率，然而随着脉冲频率的升高，电机线圈的**阻抗**也随之增大，使线圈中的电流相应减小，同时电机转矩也将减小。可以说，步进电机本来是一种不适合高速运行的电机，但这可以从控制电路上来克服这个缺点，通常有以下几种方法。

阻抗

外部串联电阻法 这种方法如图 5.14 所示。在电机线圈回路中插入**串联电阻**，并使用比步进电机额定电压高出数倍的电源电压，当电机高速运转时，通常可以控制电机的电流值不变，在简单的电路中，可以用来提高电机的转速。然而当电机低速运行时，电阻上的能量损耗很大，导致电源的效率降低，这也是这种方法的缺点。一般说来，选用的外部串联电阻值为步进电机线圈电阻的 2～3 倍较为适宜。

串联电阻

恒电流法 恒电流法是一种电机电流为恒值的**负反馈控制**方法(见图 5.15)。用比电机额定电压高出数倍的电源电压，将电机线圈中流过的电流信号与给定电压信号做比较，以此来控制高速运转时电机线圈的电流恒定不变。为了检测线圈电流，可以在线圈回路中串联一个很小的电阻(1Ω 左右)，这个小电阻对电路的影响可以忽略不计。恒电

负反馈控制

流法不仅可以提高电机的转速，还能够改善电源的效率，节能效果明显，不存在外部串联电阻法的能量损耗问题。采用这种控制方式的步进电机驱动电路比较复杂，但是利用专用的**恒电流斩波驱动 IC** 可以简单地构成恒电流法控制电路。

恒电流斩波驱动 IC



图 5.14　外部串联电阻法

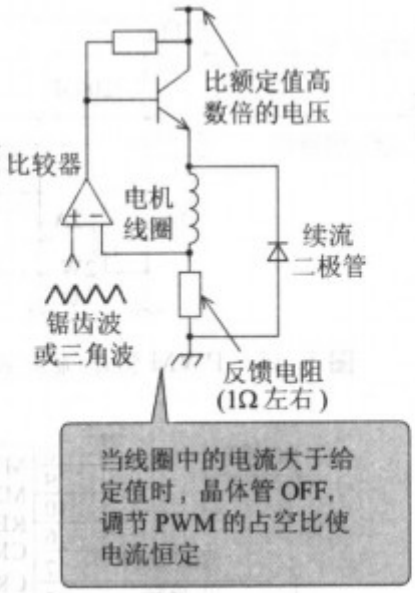


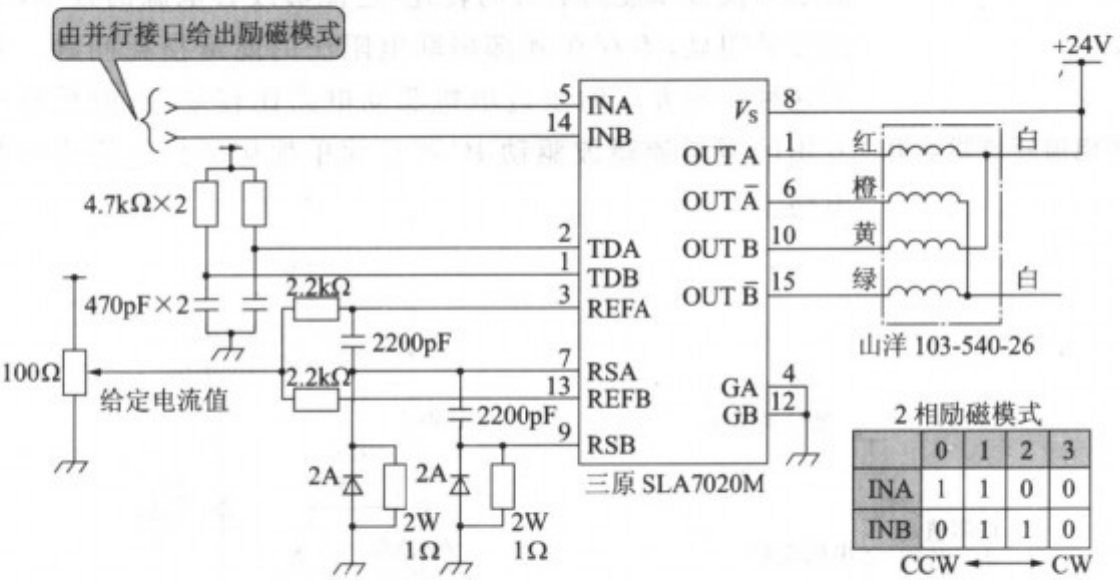
图 5.15　PWM 方式的恒电流法

由 PWM 方式恒电流斩波驱动 IC 构成的高速运行电路

图 5.16 所示为由 PWM 方式恒电流斩波驱动 IC 和 SLA7020M(三原电气)构成的控制电路例。电路为单极型驱动方式，功率放大器采用功率 MOSFET。由于功率较小时电路的发热量较少，因此可以把电路置于一个 IC 芯片中。对于 2 相步进电机采用两相励磁方式驱动时，当脉冲频率达到 10kpps(pulse/second)以上时，仍然可以高速运行。

图 5.17 是由 TA8435H(东芝)构成的控制电路。这种 IC 同样是采用了 PWM 方式的恒电流斩波驱动电路，用于步进电机双极型驱动方式，芯片内具有励磁模式发生功能。除具有单相、双相及单-双相励磁模式外，还具有**微动驱动功能**(32 倍细分)，可进一步使系统的位置精度得以提高。

微动驱动功能



	0	1	2	3
INA	1	1	0	0
INB	0	1	1	0

图 5.16　PWM 恒电流方式的高速运转控制电路(单极型驱动)

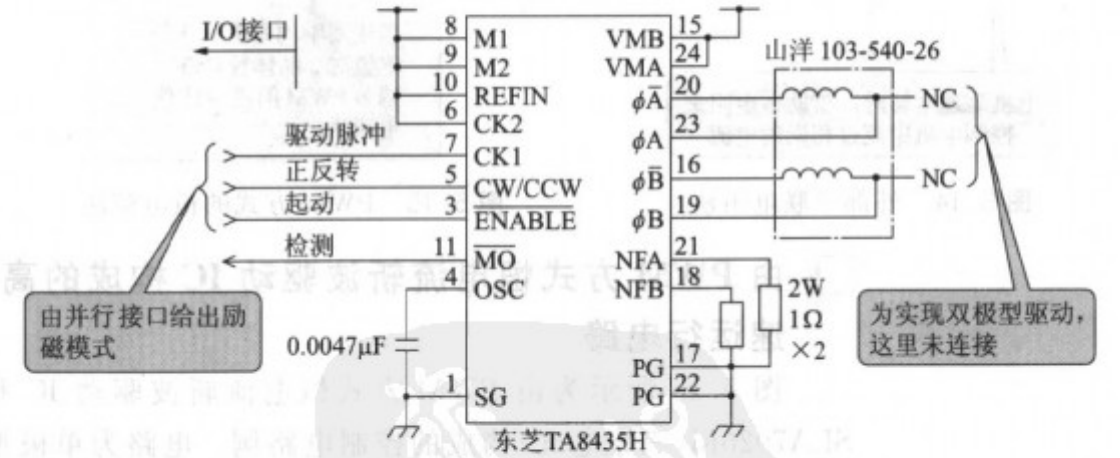


图 5.17　PWM 恒电流方式的高速运转控制电路(双极型驱动)

7 直流电机

要 点

使用直流电源的电机叫做直流电机。直流电机使用简单，只需把直流电机的端子接到直流电源上就可以使其运转。直流电机是一种具有优良控制特性的电机。为了能够掌握直流电机的使用方法，首先必须很好地掌握其基本特性，即 T-I、T-N 特性曲线。

解 释

直流电机的结构及其工作原理

定子　转子
换向器　电刷

图 5.18 所示为直流电机的结构与图形符号。由图中可以看出，直流电机由永磁钢构成的**定子**、绕有线圈的**转子**、**换向器**及**电刷**等构成。当电流通过电刷和换向器流过线圈时产生转子磁场，这时转子成为一个电磁铁，在转子与定子之间产生吸引力或推斥力使转子旋转。由电刷和换向器来切换电流方向，使电机按同一方向旋转并带动负载做功。

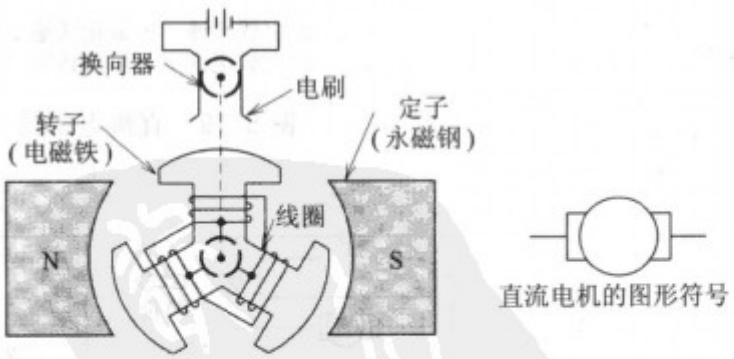


图 5.18　直流电机的结构与图形符号

直流电机的特征

启动转矩
寿命　噪声
位置控制
速度控制
转速传感器
闭环控制方式

作为控制用电机，直流电机具有**启动转矩**大、体积小、质量轻、转矩和转速容易控制及效率高等十分优良的特性。但是，由于有电刷和换向器，在其**寿命**、**噪声**等方面必然存在不足。为了克服这一缺点，开发研制出了无刷直流电机。在进行**位置控制**和**速度控制**时，需要使用**转速传感器**，实现位置、速度负反馈的**闭环控制方式**。

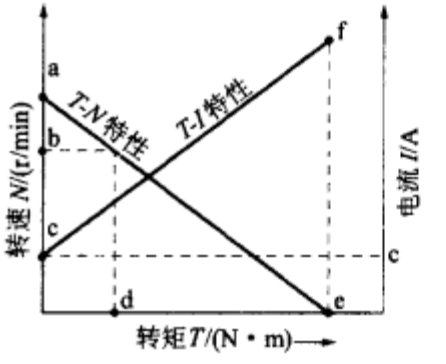
直流电机的基本特性

图 5.19 所示为直流电机的基本特性（T-I、T-N 特性曲线）。图中给出了转速 N 与转矩 T 之间的关系曲线，以及电流 I 与转矩 T 之间的关系曲线，这两条特性曲线绘制在一个图上。图 5.20 所示为**直流（DC）电机的等效电路**。由图可知，直流电机产生的转矩与电机电流成比例。当电机转速为零时电流为最大值，同时产生最大转矩（**启动转矩**）。随着转速的升高，线圈的**反电动势**相应增大，电流逐渐减小，转矩也随之变小。

直流（DC）电机的等效电路

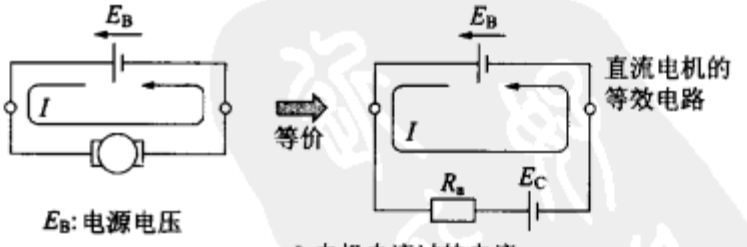
启动转矩

反电动势



a: 空载转速　b: 额定转速　d: 额定转矩
c: 空载电流　e: 启动转矩　f: 启动电流

图 5.19　直流电机的基本特性



E_B: 电源电压
R_a: 电机内阻
E_C: 电机反电动势

I: 电机中流过的电流
$E_B=R_aI+E_C$

图 5.20　直流电机的等效电路

相关知识

◆ 无刷直流电机

直流电机的换向器部分可以用霍尔元件和半导体开关元件来代替（在后面将说明其使用方法）。

8 直流电机的启-停控制

要 点

所谓启-停(ON-OFF)控制，简单地说就是使电机运行或停止的控制方法，这是一种较简单的控制方法。然而在家电产品及FA线路中却被大量应用。一般情况下，可采用继电器来实现直流电机的ON-OFF控制，此外也经常采用晶体管、FET、光电MOS继电器等无触点开关元件。

解 释

ON-OFF控制

ON-OFF控制不是去进行速度控制或位置控制，而是一种简单地使电机运行或停止的控制方法。用于**FA线路**等场合时，常使用**可编程序控制器**对电机的旋转或停止进行控制。ON-OFF控制中经常使用的是**继电器**。但是由于存在机械触点，要想免维护是不可能的。因此，大功率晶体管、功率MOSFET及光电MOS继电器等无触点开关的应用正在逐渐增多。

ON-OFF控制

FA线路

可编程序控制器

继电器

使用继电器的直流电机ON-OFF控制

目前，直流电机的ON-OFF控制仍广泛使用继电器。采用继电器控制时，控制电路与电机主电路可以完全**绝缘**，所以不容易受到噪声信号的影响，即使电机主电路发生故障，控制电路也不会受到损坏。但是，由于使用机械触点，必须注意继电器的使用寿命问题。图5.21所示为使用继电器的直流电机ON-OFF控制电路。

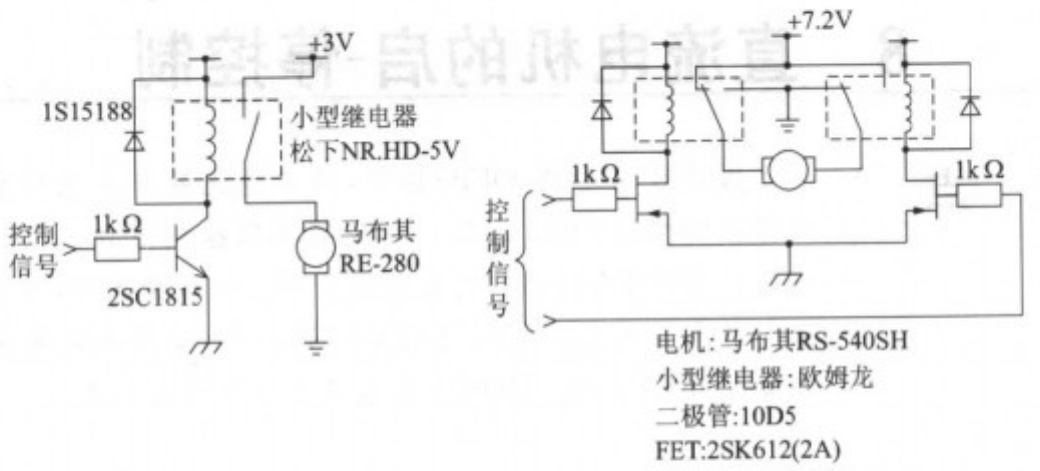
绝缘

图5.21(a)所示为使用**小型继电器**的小功率直流电机控制电路。运行时继电器触点闭合，停止时触点断开。图中的二极管是必需的元件，这是因为当继电器触点断开时，线圈产生的反电动势有可能损坏三极管，设置该二极管就可以起到保护三极管的作用。图5.21(b)所示为使用**接触器**的大功率直流电机控制电路。该电路可以用来控制电机的正转、反转、断电和**能耗制动**等四种状态。

小型继电器

接触器

能耗制动



(a) 小功率直流电机的控制电路　　(b) 大功率直流电机的控制电路

图 5.21　使用继电器的直流电机 ON-OFF 控制电路

使用大功率晶体管的直流电机 ON-OFF 控制

电压驱动
电流驱动
射极跟随器(共集电极)电路

晶体管在作为开关元件使用时，有**电压驱动**和**电流驱动**两种驱动方法，如图 5.22 所示。

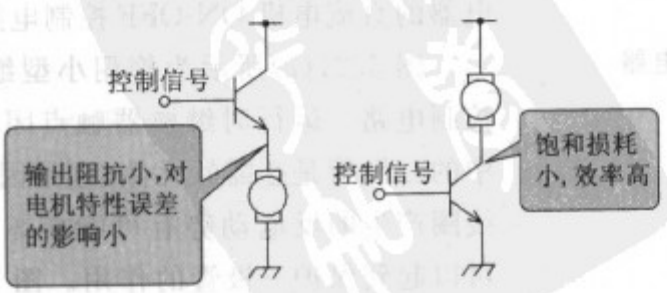
① 电压驱动电路。由于电压驱动电路是一个**射极跟随器(共集电极)电路**，其输出阻抗小，对电机特性误差的影响也小，这是电压驱动电路的优点。但是，由于晶体管的饱和损耗较大，与电流驱动相比，电压驱动的效率较低。

共发射极电路

② 电流驱动电路。由于电流驱动电路为**共发射极电路**，功率增益大，因此效率较高。但是，容易影响到电机特性的误差及晶体管放大倍数。这一点是应该加以注意的。

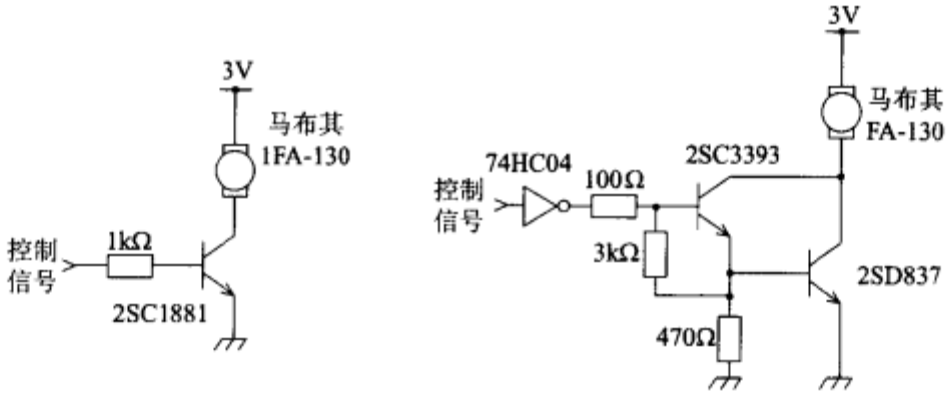
大功率晶体管

图 5.23所示为使用**大功率晶体管**的直流电机 ON-OFF 控制电路。



(a) 电压驱动电路　　(b) 电流驱动电路

图 5.22　晶体管的电压驱动与电流驱动



(a) 达林顿大功率晶体管的应用　　(b) 达林顿连接

图 5.23　使用大功率晶体管的直流电机 ON-OFF 控制电路

相关知识

◆ 光电 MOS 继电器

光电 MOS 继电器是一种光耦合器与功率 MOSFET 结合起来的半导体继电器。这种开关元件把继电器的绝缘性和半导体开关的免维护性的优点集于一体。

题外话

相扑机器人真空装置的 ON-OFF 控制

相扑机器人是由机械、计算机和控制系统融合在一起的一种机器人，是学习机电一体化技术时最为合适的对象。最近，制作相扑机器人的技术水平显著提高，在赛场上，能够贴住对手并将其制服的相扑机器人逐渐多起来。

能够贴住对手的吸引型相扑机器人中常利用以下几种结构。

① 汽车的车内用吸尘器(DC 12V)，为插头式连接，电源电压为 12V。

② 家庭用充电式小型吸尘器(充电式)，为充电式结构，电源电压为 4V。

上述结构的吸尘器可以很便宜地从 DIY 商店中买到，拆开后，可以取出需要的部分(吸引风扇和电机部分)直接使用。

使用接触器的驱动电路与 5.13 节中介绍的螺线管驱动电路相同。使用功率 MOSFET 时，通常工作电流为 10A 左右，功率放大器和电机将会发热，因此，应有必要的降温措施。铝是热的良导体，散热效果良好。通常可以将

功率 MOSFET 器件和电机直接装配到机器人本体(通常为铝合金材料)上。

另外,使用功率 MOSFET 不仅能实现 ON-OFF 控制,而且还可以实行 PWM 控制,因此也可以实现风扇电机的电流控制。

9　直流电机的线性控制与 PWM 控制

要　点

直流电机转速控制方法主要有线性控制方式和 PWM 控制方式。当作为小功率电机平滑控制时常使用线性控制方式，作为大功率电机高效控制时，则使用 PWM 控制方式。

解　释

直流电机的转速、转矩控制

为了改变直流电机的转速和转矩，可以采取以下不同的控制方法。

① 进行电机转速调节→可改变电源电压。

② 进行电机转矩调节→可改变电枢电流。

实际上，进行上述调节时，电压和电流是同时变化的，因此电机的转速和转矩也在同时发生变化。例如，充电式电动扳手使用的直流电机，在转速变化的同时，紧固力矩也会发生变化。因此，在对直流电机进行转速、转矩控制时，一般均采用改变输入电压的方法。改变输入电压主要有**线性控制方式**和 **PWM 控制方式**两种。

线性控制方式
PWM 控制方式
电阻控制方式

线性控制方式　其原理如图 5.24 所示，它也可称为**电阻控制方式**。在电机与电源之间插入晶体三极管，这个晶体三极管相当于一个可变电阻器，也就相当于控制了加于电机上的电压，从而改变电机的转速和转矩。晶体管工作于**不饱和区**，基本上与低频功率放大器的电路结构相同。

不饱和区

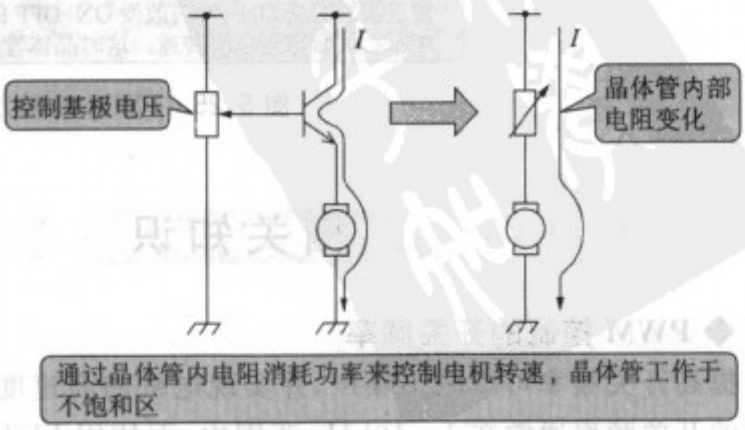


图 5.24　线性控制方式的原理

由于直流电机线性控制方式不改变电流的波形，因此，对电刷、换向器的换向作用影响很小，可以做到转速的平滑调节。但是，由于晶体三极管产生的**功率损耗**将变成**焦耳热**而消耗掉，使得线性控制方式的效率降低，因此这是一种不经济的控制方法。可用于额定功率为数瓦的小型电机的控制电路。

功率损耗
焦耳热

PWM控制方式　**PWM**(Pulse Width Modulation)**控制方式**的原理如图5.25所示，是**脉冲控制方式**的一种。晶体三极管作为一个开关，使加到电机上电压的ON与OFF的时间比(**占空比**，duty ratio)发生变化，从而控制电机电压的平均值。由于三极管工作于**饱和状态**，几乎不消耗功率，因此PWM控制方式具有良好的经济性。但由于电机供电电压处于开关状态，因此会导致噪声、振动以及电刷、换向器损伤等问题；这些问题从控制技术上已经逐步得到解决。PWM控制方式已经成为现代直流电机控制技术的主流。

PWM控制方式
脉冲控制方式
占空比
饱和状态

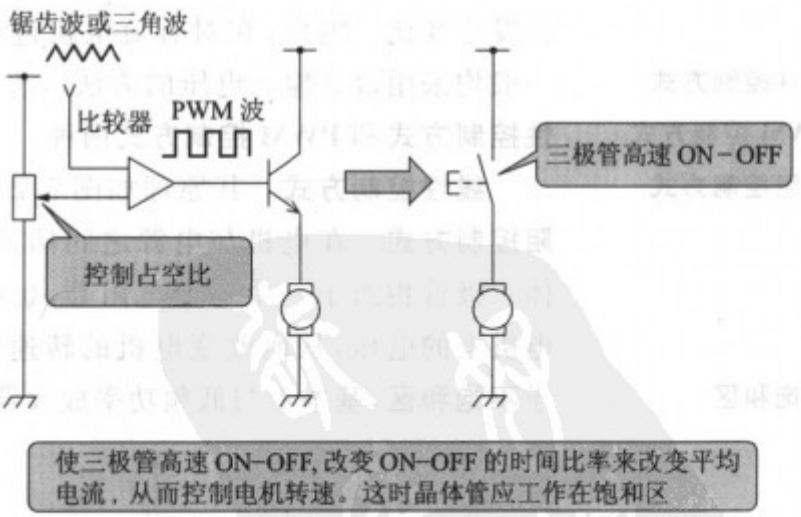


图5.25　PWM控制方式原理

相关知识

◆ PWM控制的开关频率

提高开关频率可以减小噪声，并实现电机的高速度、高精度驱动。晶体三极管的开关频率通常在1～10kHz范围内，而使用FET或IGBT时，开关频率可提高到数十千赫。

10　直流电机的线性控制电路例

要　点

采用直流电机线性控制电路时，由于电机运转时的电流波形不变，因此对电刷、换向器的影响很小，可以做到平滑运转。实用上，为了增加直流电机的转速稳定性，多采用闭环控制方式。

解　释

线性控制时的转速稳定性

转速传感器
闭环控制方式

采用直流电机线性控制方式时，为了使电机平滑运转，常使用**转速传感器**构成**闭环控制方式**来保持电机转速的稳定性。由于线性控制电路的晶体三极管工作于线性段，效率很低，因此主要用于控制额定功率为几瓦的小型电机。

图 5.26 是几种线性控制的直流电机转速稳定性电路。根据转速检测方法的不同，反馈控制电路可作如下分类。

桥式伺服控制

① **桥式伺服控制**：检测直流电机旋转时产生的反电动势（与转速成比例）。

比例电流伺服控制

② **比例电流伺服控制**：由电阻检测直流电机的电流值。

直流伺服控制
直流测速发电机

③ **直流伺服控制**：检测**直流测速发电机**（基本构造与直流电机相同）输出的与转速成比例的电压。

FG 伺服控制　FG
旋转编码器

④ **FG 伺服控制**：由 **FG**（Frequency Generator，频率发生器）或**旋转编码器**（rotary encoder）检测频率（与电机转速成比例）。

以上①和②不需要特别的转速传感器，主要用于纸带记录仪等低频仪器。③和④大多用于对转速稳定性要求很高的机器人和数控机床等机械系统的控制。

直流伺服电路举例

运算放大器

图 5.27 所示为一个直流伺服电路。图中使用了直流电机（马布其 RE-280）来代替直流测速发电机。采用**运算放大器**构成比较电路，对设定电压与来自直流测速发电机的反馈电压进行比较。实验时，需用示波器观察直流测速发电机的输出电压波形，同时需要调节滤波器的时间常数。

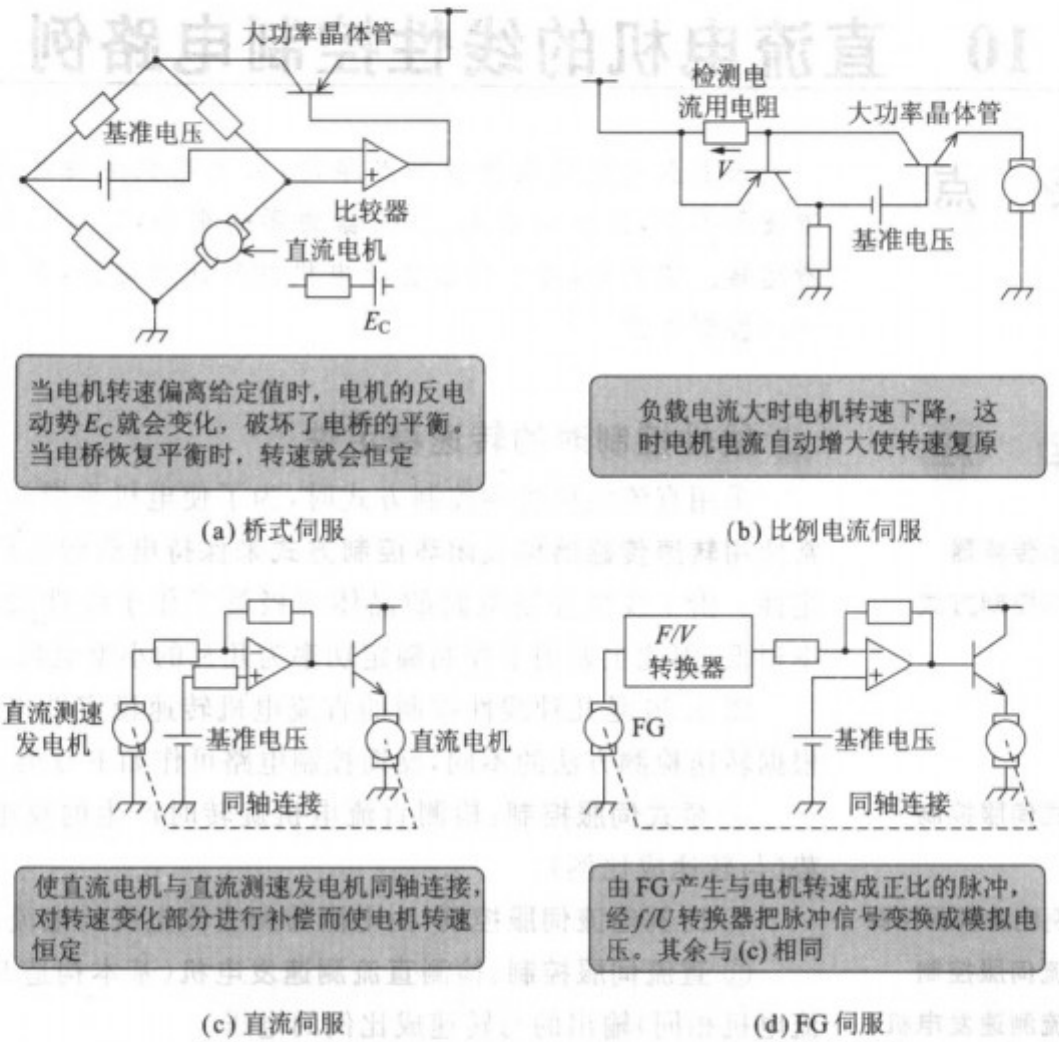


图 5.26　几种线性控制的直流电机转速稳定性电路

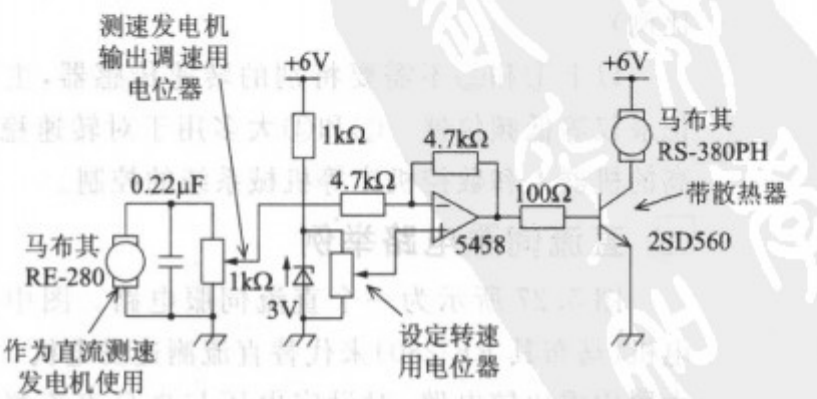


图 5.27　直流伺服电路示例

相关知识

◆ 旋转编码器

将发光二极管和光电三极管组合起来就构成了一个转速传感器。由于其输出为数字信号，因此不仅可以很容易地测得转速，而且也可以容易地测得旋转角位移（位置信息），适用于速度控制和位置控制同时进行的场合。

11　直流电机的PWM控制电路例

要　点

当需要对电机转速进行控制的同时又要求正、反转运行时，常采用PWM控制方式。由于PWM控制需要高速开关，常使用功率MOSFET作全桥连接。PWM控制电路比较复杂，目前用于小型电机的控制电路已集成为专用IC芯片，市场上很容易购买到，应用起来十分方便。

解　释

直流电机PWM的控制原理

直流电机PWM的控制原理如图5.28所示。图5.28(a)所示为利用PWM发生器来调节电机转速的方法，PWM波形的**占空比**由输入的模拟电压控制。在图5.28(b)中，由微型计算机的I/O接口直接产生PWM信号，用该信号来驱动大功率晶体管的开关，从而控制直流电机的转速。在任何情况下，都需要设置**续流二极管**，以便在晶体三极管OFF期间电机电流能够继续流通而使电机平滑地旋转。在PWM控制方式时，电机中将流过的平均电流与PWM波形的占空比成

占空比

续流二极管

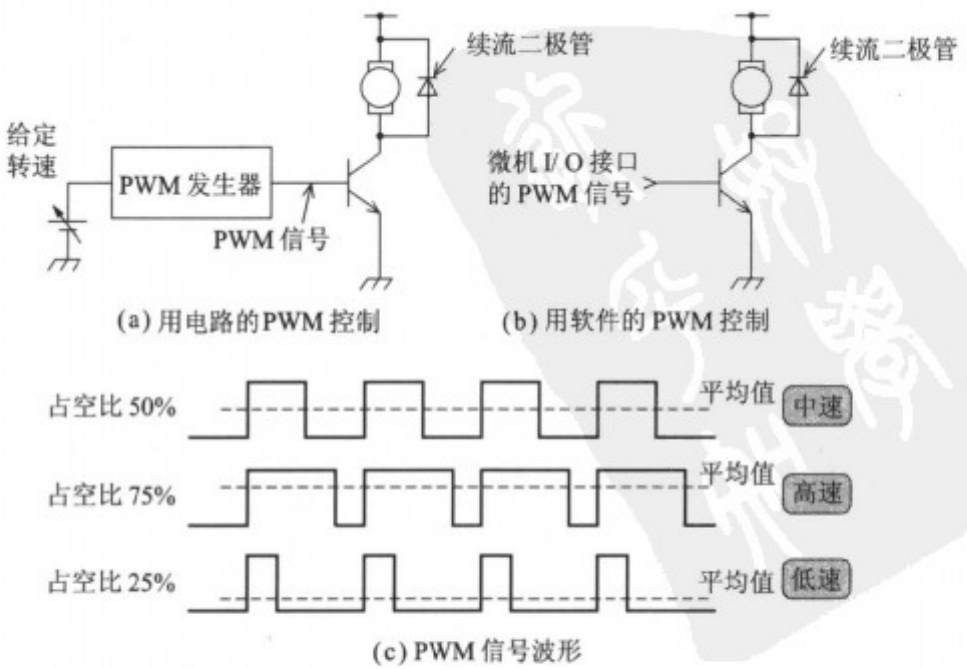


图5.28　PWM的控制原理

比例，如图 5.28(c)所示，改变占空比就可以控制电机的转速。

直流电机的 PWM 控制电路举例

PWM 发生器

图 5.28 所示为由 **PWM 发生器**产生 PWM 波来控制直流电机正、反转和转速的电路，其中直流电动机为 CYLINOID，用来代替液压油缸。机电一体化技术中，电机的控制很少使用如图 5.28 所示的单方向控制，一般情况下都采用如图 5.29 所示的正、反转控制与转速控制。PWM 发生器中，由控制二极管 1S1588 的 ON 和 OFF 的时间来产生 PWM 信号，调节可变电阻器可以改变 PWM 信号的占空比。当占空比为 50%时，电机停止，占空比接近 0%时在正转方向高速运行，占空比接近 100%时在反转方向高速运行。

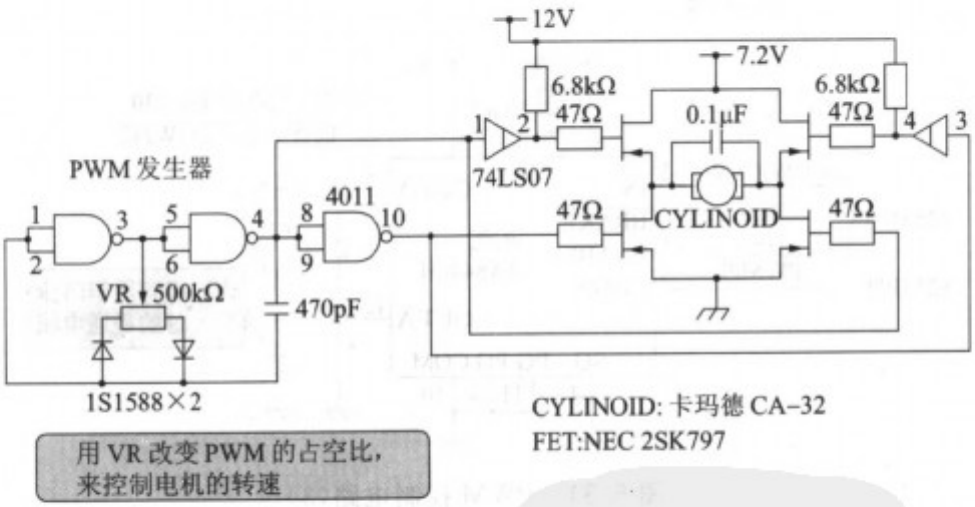


图 5.29 PWM 控制电路(1)

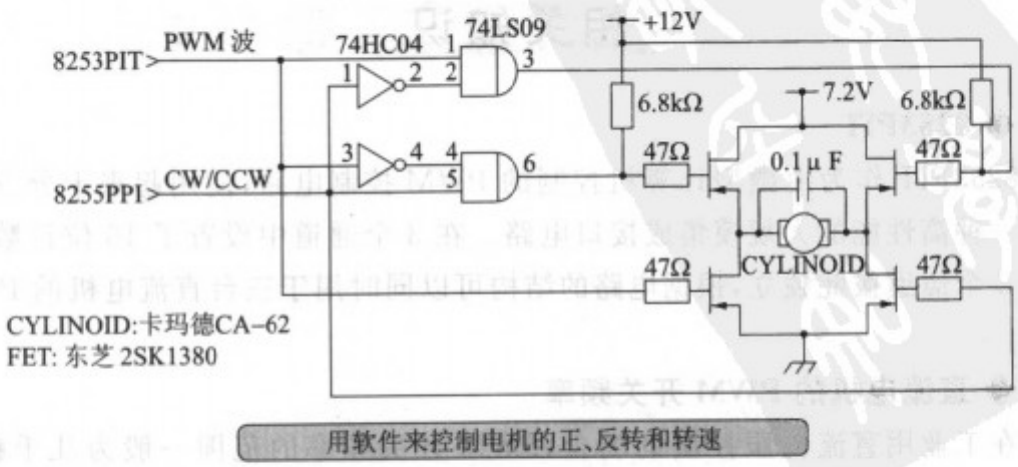


图 5.30 PWM 控制电路(2)

计数器/定时器用LSI

图5.30所示为一种可同时实现直流电机正、反转控制和转速控制的电路。电路中同样采用了CYLINOID，该控制电路要与微型计算机结合起来使用。8253PIT为**计数器/定时器用LSI**（大规模集成电路），具有按程序自动产生PWM信号的功能，因而不会增加CPU的处理负担，在机电一体化技术中是一种重要的接口电路。

图5.31所示为一个电流约1A的小型直流电机正、反转和转速控制电路，它也是一种与微型计算机结合使用的控制电路。在图5.29和图5.30所示的分离式电路中，必须有脉冲分配电路和高速开关的偏置电路，而图5.31中的TA8440H可以把上述功能集中于一个IC芯片中，使用十分方便。

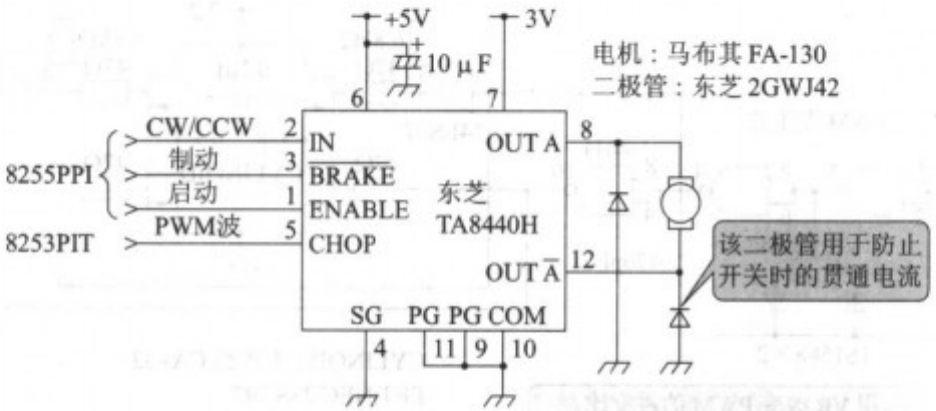


图5.31　PWM控制电路(3)

相关知识

◆ 8253PIT

8253PIT作为由微型计算机控制的PWM控制电路，使用起来十分方便，它是一种高性能的大规模集成接口电路。在3个通道中设置了16位计数器。由于3个通道彼此独立，根据电路的结构可以同时用于三台直流电机的PWM控制。

◆ 直流电机的PWM开关频率

在工业用直流伺服控制的场合，PWM开关频率的范围一般为几千赫至20kHz。频率高低的选择应以开关器件的噪声小为原则。由于马布其公司生

产的RS-540系列直流电机的响应较差，不宜用于过高频率下的开关电路中，其开关频率一般在几百至1000Hz比较适宜。

◆ 单片微型计算机的应用

把PWM控制电路与微型计算机结合起来用于机械系统控制时，可以采用具有PWM信号产生功能的单片微型计算机来简化电路结构。

12　直流电机的正转、反转控制电路

要　点

在进行点位控制时，电机的正、反转控制技术是不可缺少的。直流电机具有良好的控制性能，也容易实现正、反转控制。直流电机的正、反转控制电路有单电源方式和双电源方式两种。目前，用于点位控制时，常用的是PWM开关型单电源方式的正、反转控制电路。

解　释

正、反转控制电路的构成

电机的正、反转电路对于点位控制来说是十分必要的，而由于直流电机的控制性能优越，因此特别适用于点位控制。为了实现直流电机的正、反转运行，只需要改变电机电源电压的极性即可。为此，有**双电源方式**和**单电源方式**两种，下面分别加以介绍。

双电源方式
单电源方式

双电源方式　如图5.32所示，用于切换电机电压极性的两只晶体三极管分别为npn型(Q_1)和pnp型(Q_2)。这种切换方式也称为**半桥方式**。为使正、反转动作特性在电气

半桥方式

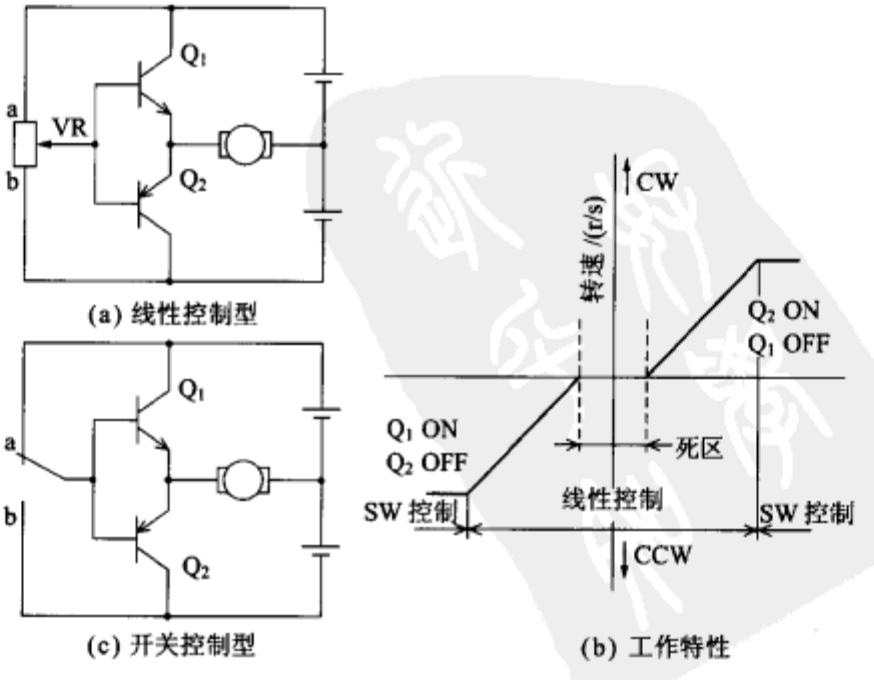


图5.32　双电源方式的正、反转控制电路

互补型晶体三极管

上完全相同，采用了**互补型晶体三极管**。

线性控制型

线性段

图 5.32(a)所示为**线性控制型**正、反转控制电路。由于晶体三极管 Q_1 和 Q_2 工作在**线性段**，当调节可变电阻 VR 时，通过正的或负的模拟电压使晶体三极管的基极电位增、减，就可以使电机在正、反转动作的同时实现转速控制。图 5.32(b)所示为线性控制型正、反转控制电路的工作特性。首先，VR 在偏向 a 的方向时，晶体三极管 Q_1 导通，电机正方向(CW)旋转。而 VR 在偏向 b 的方向时，晶体三极管 Q_2 导通，电机反方向(CCW)旋转。VR 位于 ab 的中点时，Q_1、Q_2 均关断，这时电机停止运行。如图 5.32(b)所示，在

死区

VR 的中点附近，电机不工作的区域称为**死区**。由于线性控制方式时晶体三极管工作在线性段，因此工作效率较低，主要适用于小型电机的控制。

开关控制型

饱和段

图 5.32(c)所示的电路称为**开关控制型**正、反转控制电路。在这个电路中，使晶体三极管工作于特性的**饱和段**，即作为开关来工作，可以用作电机的正、反转控制，工作效率较高。但该电路不能实现转速控制。

单电源方式　如图 5.33 所示，采用四只晶体三极管来切换电机端电压的极性。单电源方式又称为**全桥方式**或

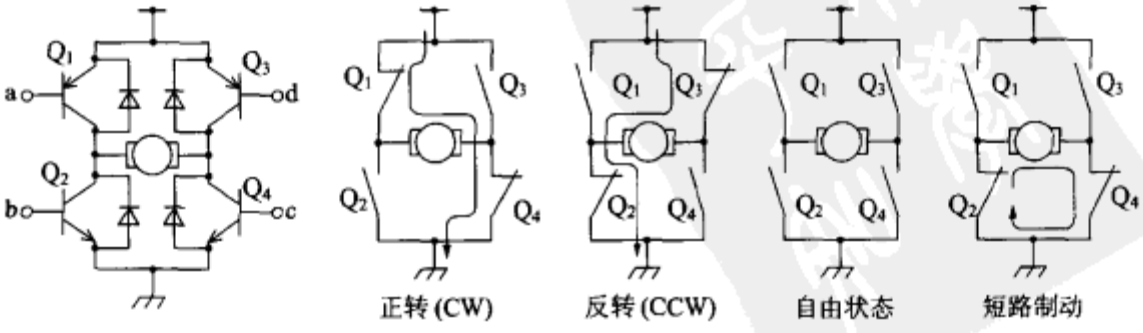
全桥方式

H 桥方式

H 桥方式。在图 5.33(b)中，电机正转时晶体三极管 Q_1 和 Q_4 导通，反转时 Q_2 和 Q_3 导通。在这两种情况下，加于电机的电压极性相反。当四个晶体三极管全部关断时，电机停转(自由状态)。若使 Q_1 与 Q_3 关断而 Q_2 与 Q_4 同时导通时，

短路制动

电机处于**短路制动**状态，将瞬时停止转动。



(a) 电路构成　　(b) 通过开关的动作切换

图 5.33　单电源方式的正、反转控制电路

单电源方式一般应用于数字控制。这种电路与微型计算机结合起来使用可实现电机转速的开关控制(PWM 控制)和短路制动。由于开关控制的工作效率很高,因此可以用于大功率电机的控制。

双电源方式的正、反转电路举例

图 5.34 所示为使用晶体三极管的双电源方式正、反转控制的实用电路。大功率晶体管 2SD880 和 2SB834 为互补型晶体三极管,它们与**驱动级三极管** 2SC1815 和 2SA1015 连接成**达林顿方式**,以进一步增大其电流放大倍数。

驱动级三极管

达林顿方式

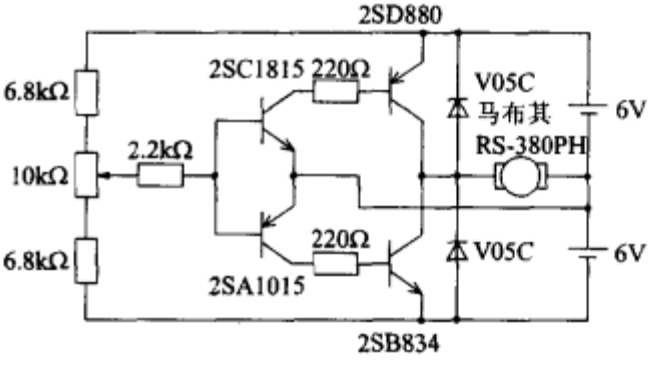


图 5.34　双电源方式的实用电路实例

图 5.35 所示为一种使用伺服放大器的双电源式位置伺服控制电路。它采用可变电阻器作为**分压器**,使电阻值与旋转角度成比例变化。当可变电阻器与电机轴的旋转联动时,就可以确定转子旋转位置。当电机旋转到位置指令 VR 所指定的位置时,伺服放大器的输入电压为零,电机停止转动。由于伺服放大器的**输入阻抗**非常大,因此采用这种分压器最为合适。

分压器

输入阻抗

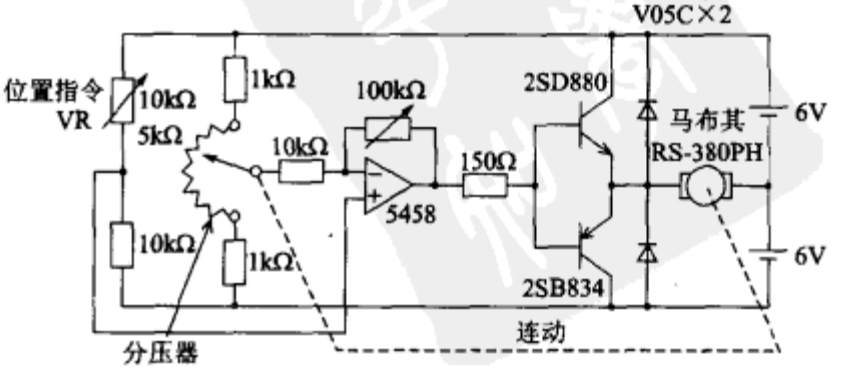


图 5.35　位置伺服控制(双电源方式)

单电源方式的正、反转控制电路例举

图 5.36 所示为一种使用大功率 MOSFET 的单电源方式正、反转控制电路。该电路由微型计算机控制，与无线电设备中使用的功率放大器具有大致相同的性能。图中所示的大功率 MOSFET 可以用逻辑电平直接驱动，也可以与微型计算机的接口电路 LSI 直接连接。为了使**高位开关**（上侧的 FET）完全饱和，需要由 74LS06 来提高电平。由于大功率 MOSFET 内部的漏极和源极之间设置了**寄生二极管**，因此不需要外接**续流二极管**，电路比较简单。

高位开关

寄生二极管

续流二极管

在图 5.36 中，如果大功率 MOSFET 的 Q_0 和 Q_2 导通为正转，这时 Q_1 和 Q_3 必须关断。反之，Q_1 和 Q_3 导通反转时，Q_0 和 Q_2 必须关断。

Q_1 和 Q_2 导通时为短路制动状态，这时 Q_0 和 Q_3 必须关断。同样，在 Q_0 和 Q_3 导通的短路制动状态时，Q_1 和 Q_2 也必须关断。

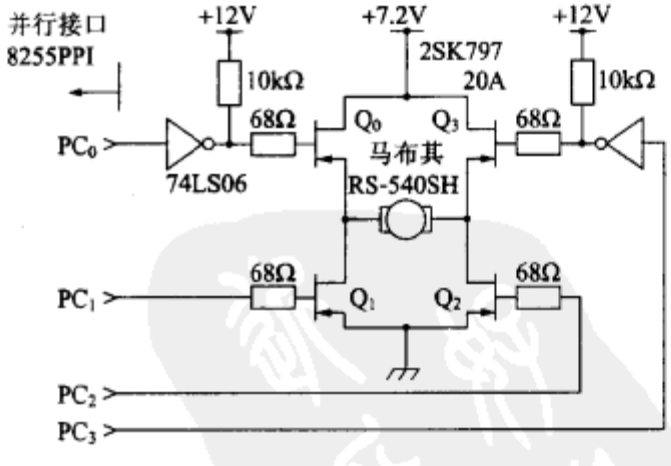


图 5.36　单电源方式的正、反转控制电路

13　超声波电机

要　点

所谓超声波电机是通过超声波使压电体振动，在定子表面产生行波，驱动与它接触的转子转动，从而得到力矩的电机。

解　释

超声波电机

超声波电机的特点

超声波电机有如下特点。

① 不需要减速机构就能够得到大的转矩。

② 在电源关断的状态下也有保持力。

③ 响应速度快。

④ 能够进行高精度的速度控制和位置控制。

⑤ 静音。

⑥ 不产生磁场。

⑦ 小型化和轻量化。

主要用途

现在超声波电机主要是安装在照相机的自动调焦部分、半导体制造装置及汽车等，作为执行机构使用。已被开发出的还有做直线运动的**直线超声波电机**。

直线超声波电机

超声波电机的构造及原理

压电体

如图5.37所示，超声波电机是由与**压电体**连接的定子和与定子表面加压接触的转子构成。

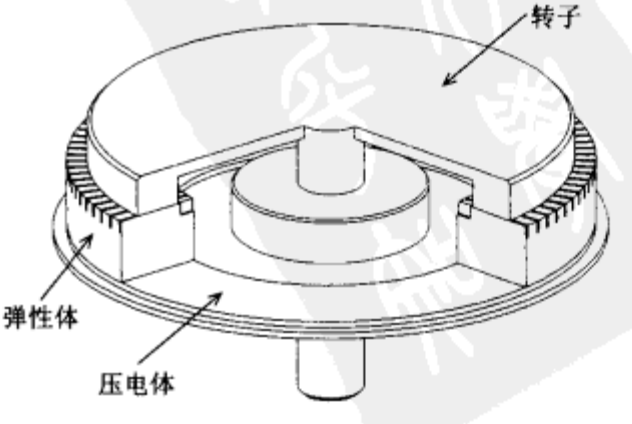


图5.37　超声波电机的结构示意

超声波电机的原理如下。

① 如图 5.38 所示，施加与压电体相位不同的大于 20kHz 的交流电压，产生超声波的振动。

弹性体

② 与压电体连接的金属是**弹性体**，它随着超声波的振动而变形。这种变形是弹性体表面的起伏向一个方向连续的行进，使弹性体的表面形成**行波**。

行波

③ 在弹性体表面形成的行波的各顶点与转子接触的同时按椭圆曲线运动。

④ 转子随着椭圆形的运动，向与定子表面产生的行波的反方向转动。

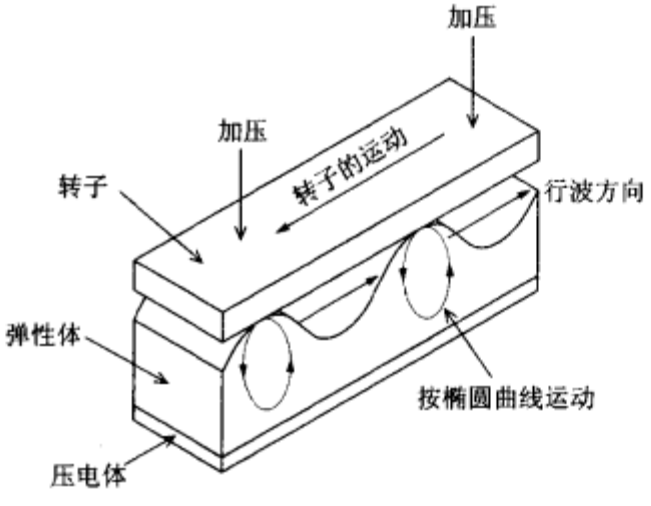


图 5.38　超声波电机的原理

相关知识

◆ 压电效应

超声波电机是根据压电效应原理设计的。压电效应是在对陶瓷或水晶等压电体外加电压时产生应变，或施加应变产生电压的现象。超声波电机的压电体主要是使用陶瓷材料，中空型的和带编码器的压电体已经产品化。压电效应除了在超声波电机上应用以外，还在其他许多领域中也有应用，如使用压电振动的加速度控制、负离子发生器和超声波加湿器等。

14　螺线管的控制电路

要　点

所谓螺线管(solenoid)是使可动铁心在电磁线圈中做直线运动的一种执行装置。作为一种微动执行装置，在机电一体化技术中是不可缺少的，一般可分为AC(交流)型和DC(直流)型两大类。

解　释

螺线管　电磁铁

螺线管的工作原理

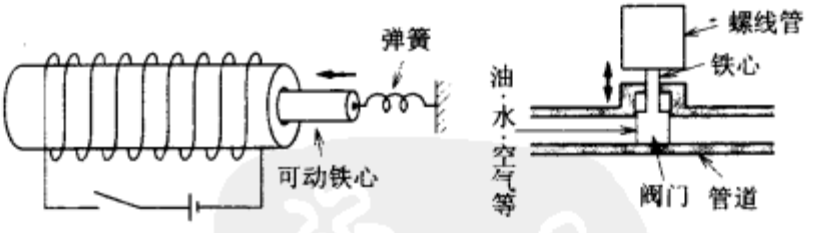
螺线管也称为**电磁铁**，是一种电磁铁式的执行装置。螺线管从电源吸收电能并对线圈励磁，使可动铁心受力做微小的直线运动。利用简单的电路就可以控制这种微小的直线运动。由于螺线圈的响应速度快，大多应用于液压、气压系统的**电磁阀**及各种小型机械的**直线型执行机构**中。

电磁阀

直线型执行机构

在顺序控制中，表示螺线管的符号为SOL。螺线管的结构与工作原理如图5.39所示。可动铁心的直线位移量称为**行程**。

行程



(a) 螺线管的工作原理(吸引型)　　(b) 电磁阀的结构

图5.39　螺线管的工作原理与结构

螺线管的分类

根据工作电源的不同，螺线管可分为以下两类。

① AC(交流)螺线管：响应速度快(1～5ms)，功率较大，常用于ON-OFF控制中。

② DC(直流)螺线管：与AC螺线管相比，DC螺线管的响应速度较慢，但可以实现**铁心位置**的模拟控制，体积小、质量轻。

铁心位置

另外，根据可动部分的结构，螺线管又可分为以下三类。

① 推进(push)型：工作时将可动铁心推出。

② 吸引(pull)型：工作时将可动铁心吸入。

③ 推进-吸引(push-pull)型：工作时可动铁心在螺线管内可实现推出或吸入两种动作。

螺线管的吸引力特性

吸引力
推斥力

图 5.40 所示为螺线管的**吸引力**与行程之间的关系曲线。由于吸引力(或**推斥力**)与行程的平方成比例的关系，所以螺线管不能用于行程较长的场合。

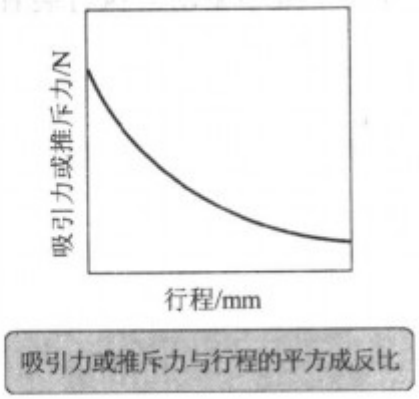


图 5.40 螺线管的吸引力特性

螺线管的驱动电路举例

图 5.41 是一种直流(DC)螺线管的驱动电路。图中二极管的作用是，当晶体三极管关断时，将线圈的反电动势短路，从而对晶体三极管起保护作用。



(a) 利用晶体管　(b) 利用 FET　(c) 利用内部有电阻的晶体管

图 5.41 直流螺线管的驱动电路

相关知识

◆ 旋转螺线管

做微小旋转运动的螺线管，其旋转角度固定，但可获得很大的转矩。旋转螺线管的工作原理与普通螺线管相同。

◆ 其他用于微小驱动的执行装置

音圈电机(voice coil motor)、力矩电机(torque motor)、压电执行装置(piezo electric actuator)等用于微小驱动的执行装置正在逐步应用到实际中。

15 交流伺服驱动

要 点

交流伺服电机的最大优点是免维护。特别是无刷直流电机，继承了有刷直流电机优良的控制性能，在机电一体化中是一种最为理想的电机。

解 释

免维护的 AC 伺服电机

交流(AC)伺服电机

机械接触部分

工业机器人和数控机床中使用的伺服电机，传统上一直采用直流(DC)伺服电机，目前正逐渐被**交流(AC)伺服电机**所取代。交流伺服电机中没有直流伺服电机的**机械接触部分**(电刷、换向器)，因此可以实现免维护。

交流伺服电机的种类

典型的 AC 伺服电机有以下三种，其结构如图 5.42 所示。

感应电机(induction motor) 感应电机的定子和转子均由铁心线圈构成，可分为单相电机或三相电机。转子铁心是用硅钢片叠压而制成，由定子产生的旋转磁场带动转子旋转。定子线圈称为一次线圈，转子线圈称为二次线圈。

转子

由于**转子**的质量轻、惯性小，因此响应速度非常快，它主要应用于中等功率以上的伺服系统中。

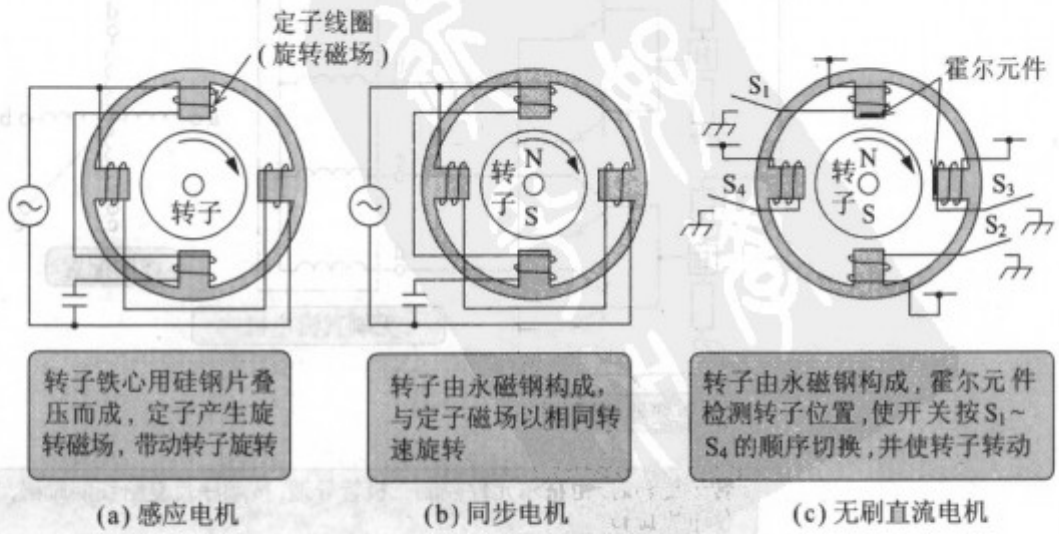


图 5.42 AC 伺服电机的种类与结构

同步电机(synchronous motor)　同步电机的转子由永久磁钢构成磁极，定子与感应电机一样由铁心线圈构成，可分为单相同步电机和三相同步电机两种。这种永磁同步电机可以做得很小，因此响应速度很快，其主要应用于中功率以下的工业机器人和数控机床等伺服系统中。

无刷直流电机(brushless DC motor)　直流电机的控制性能优良，但由于存在机械接触部分(电刷、换向器)，影响了直流电机的使用寿命，同时也存在噪声等问题。无刷直流电机如图 5.42(c)所示，它是由**霍尔元件**或**旋转编码器**等构成的位置传感器和**逆变器**(inverter)取代了直流电机的电刷和换向器部分。无刷直流电机具有与普通直流电机相同的特性，并且不需要维护，噪声小。由于转子的转动惯量很小，所以快速响应性能好。转子磁极采用永久磁钢，没有励磁损耗，提高了电机的工作效率，适用于电子电路的冷却轴流风扇电机、**防爆电机**及各种伺服系统中。

霍尔元件
旋转编码器
逆变器
防爆电机

无刷直流电机的控制电路举例

图 5.43 所示为一种无刷直流电机的控制电路，它是由霍尔元件和晶体三极管构成的逆变器电路。

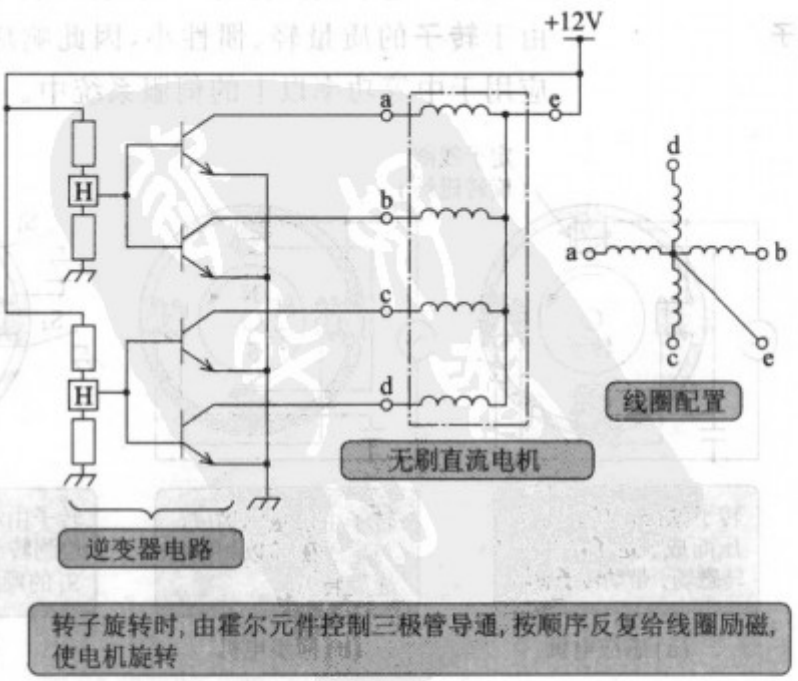


图 5.43　一种无刷直流电机的控制电路

相关知识

◆ 逆变器

逆变器(inverter)的原意为 DC/AC 变换器。一般情况下,逆变器与整流器(AC/DC 变换器)组合起来构成 AC/AC 变频器(工频电源频率变换电路),或者是在 AC 伺服电机调速电路中使用。

16　液压执行装置

要　点

所谓液压执行装置，就是把液压能量变换成直线运动、旋转运动或摆动运动的机械能，从而带动机械做功的装置。

解　释

液压执行装置的使用特点

① 由于工作压力高，所以装置可以实现小型化。

② 由于以液压油为工作介质，所以装置的润滑性和防锈性能好。

流量控制

③ 通过**流量控制**，可以很容易地改变速度。

换向控制

④ 利用**换向控制**，可以很容易地变换运动方向。

压力控制

⑤ 通过**压力控制**，可以实现力的无级控制。

种　类

液压执行装置主要有以下几类：把液压能量变换成直线运动的**液压缸**（如图 5.44 所示）；把液压能量变换成能连续旋转运动的**液压马达**（如图 5.45 所示）和把液压能量变换成摆动的**摆动马达**等。

液压缸

液压马达

摆动马达

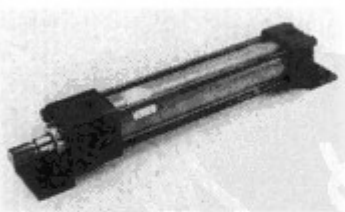


图 5.44　液压缸

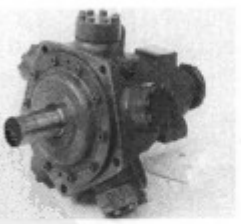


图 5.45　液压马达

主要用途

液压执行装置广泛应用于机床、成形机械、机器人、工程车辆、露天游乐场、建筑机械及农业机械等。

相关知识

◆ 帕斯卡原理

帕斯卡原理如图 5.46 所示。加于密闭容器内液体任一部分的压强将按照

其原来的大小由液体向各个方向传递，压力垂直作用于容器的表面上。

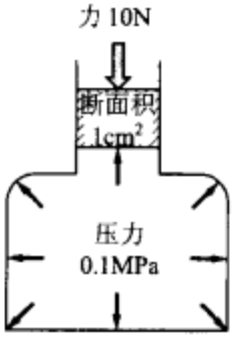


图 5.46　帕斯卡原理

例 题

如图 5.47 所示，在直径为 10cm 的小活塞上施加 200N 的力 F_1，这时直径为 25cm 的大活塞上的作用力 F_2 是多少？当小活塞向下移动 5cm 时，问大活塞向上移动多少厘米？

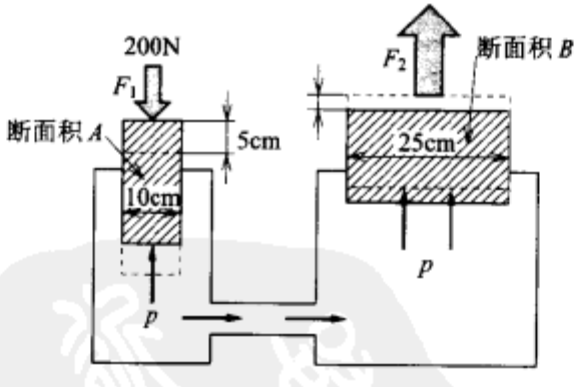


图 5.47　例题图

答　根据帕斯卡原理，作用在小活塞上的压强为

$$p=\frac{F_1}{A}$$

将有同样大小的压强作用到大活塞上，即

$$\frac{F_1}{A}=\frac{F_2}{B}$$

则作用于大活塞上的作用力 F_2 为：

$$F_2=\frac{F_1 B}{A}=\frac{200\times\frac{\pi}{4}\times25^2}{\frac{\pi}{4}\times10^2}=1250\ (\mathrm{N})$$

当小活塞移动距离 $l=5\text{cm}$ 时，则大活塞的移动量 x 为：

$$x=\frac{A\cdot l}{B}=\frac{\frac{\pi}{4}\times10^2\times5}{\frac{\pi}{4}\times25^2}=0.8\ (\text{cm})$$

课外话

关于液压的JIS标准

在JIS中，制定了以下关于液压的术语和图形符号的标准，目前已颁布执行。

① JIS B 0125-1：2001《液压与气动系统及设备-图形符号和回路-第1部：图形符号》。

② JIS B 0125-2：2001《液压与气动系统及设备-图形符号和回路-第2部：回路》。

③ JIS B 0142：1994《液压与气动名词术语》。

17　液压执行装置的工作原理

要　点

按液压执行装置的动作分类如下。

① 向液压缸内供给压力油，使活塞做往复运动，通过活塞杆将活塞上的力传到外部，作为执行装置的输出。

② 向机器的油腔内供给压缩油，推动叶轮旋转而实现旋转运动的执行装置。

解　释

液压执行装置的特点

液压执行装置的主要特点是能够将液体能量简便地转换为运动的机械能量，其输出功率大是液压执行装置的一大特点。

液压执行装置的应用范围很广。因为液压系统的操作简单，所以人们针对各种负荷条件在机械和油路等方面都做了大量的研究开发工作，使液压执行装置在很多工业领域中获得了广泛应用。

液压系统的构成

如图 5.48 所示，液压系统的工作过程就是将从液压泵获得压力能量的工作油输入液压缸或液压马达，从而把液压能量转换成机械能量来驱动机械做功。液压传动装置的构成如下。

液压源　① **液压源**：油箱、油泵、驱动电机、发动机。

控制阀　② **控制阀**：压力控制阀、方向控制阀、流量控制阀。

液压执行装置　③ **液压执行装置**：液压缸、液压马达、摆动液压马达。

附属设备　④ **附属设备**：管件、仪表、冷却器等。

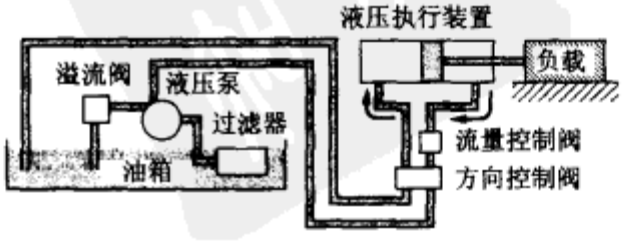


图 5.48　液压系统的构成

⑤ 其他设备。

液压的基本使用方法

图 5.48 所示为应用液压系统的基本回路，这是一个简单的液压系统。此外，还有许多种液压元件，为了满足一定的控制要求，应用时可根据实际情况利用这些元件对上述系统进行适当配置。

液压缸的工作原理

液压缸(见图 5.49)是一种把表现为压力和流量的液压能量转换成直线运动能量的装置。根据其结构和功能，可以分成很多种类型。

液压缸由缸体及在缸体内滑动的活塞和活塞杆等构成，其工作原理如下。

① 高压油从 A 口进入缸体内并推动活塞，排油侧的油通过 B 口排出，这样在活塞两侧产生压力差，使活塞向前移动。

② 反之，如果从 B 口供油，从 A 口排油，则活塞将向相反方向移动。

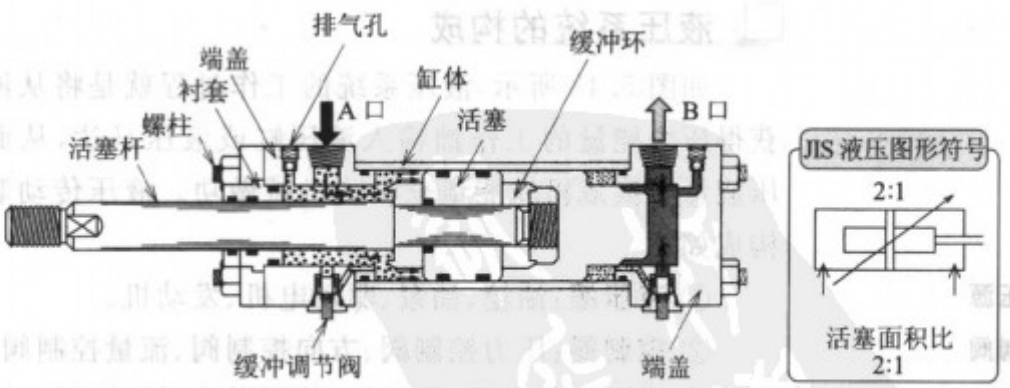


图 5.49　液压缸

液压马达的工作原理

液压马达是一种把表现为压力和流量的液压能量转换成表现为旋转运动和转矩的机械能量的装置。当液压马达的容量一定时，其转速由流量来决定，而转矩由压力来决定。液压马达有**径向活塞式**(见图 5.50)和**叶片式**(见图 5.51)等类型。**径向活塞式液压马达**的工作原理如下。

径向活塞式

叶片式

径向活塞式液压马达

① 各活塞和曲轴通过连杆连接起来，与曲轴连接的旋转阀门把从 A 口进入的压力油依次供给各个活塞。

② 受液压驱动的活塞推动曲轴产生力矩。

③ 另一侧的 B 口为排油口。

④ 如果从 B 口供油，则液压马达向相反方向旋转，此时 A 口变为排油口。

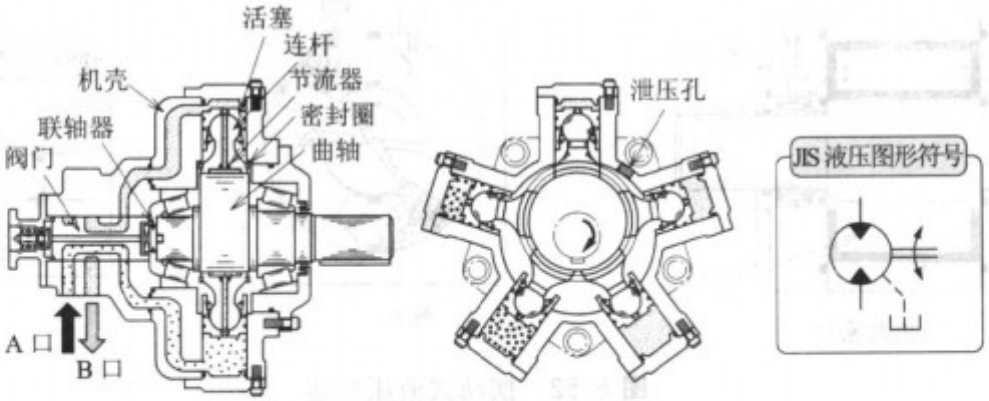


图 5.50　液压马达(径向活塞式)

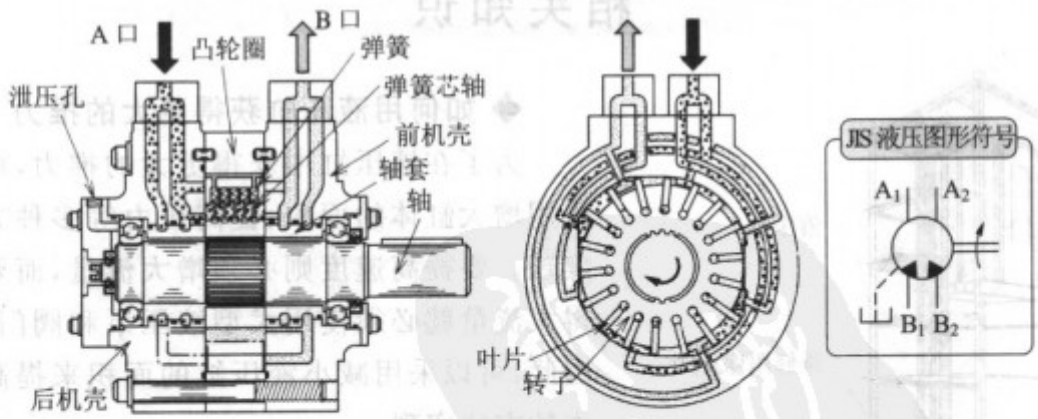


图 5.51　液压马达(叶片式)

摆动式液压马达的工作原理

摆动式液压马达(见图 5.52)是一种输出轴旋转角度受到限制的液压马达。摆动式液压马达由两个在机壳内滑动的叶片、与叶片固联的轴及两块靴状瓦等构成，其工作原理如下。

① 当从 A 口供油时，通过转轴上的通路也同时向另一侧的腔内供油。

② 排油腔内的油由 B 口排出，这时液压马达向顺时针

方向旋转。

③ 当叶片碰到制动器时，液压马达停止转动。

④ 当从B口供油时，A口为排油口，液压马达则逆时针旋转。

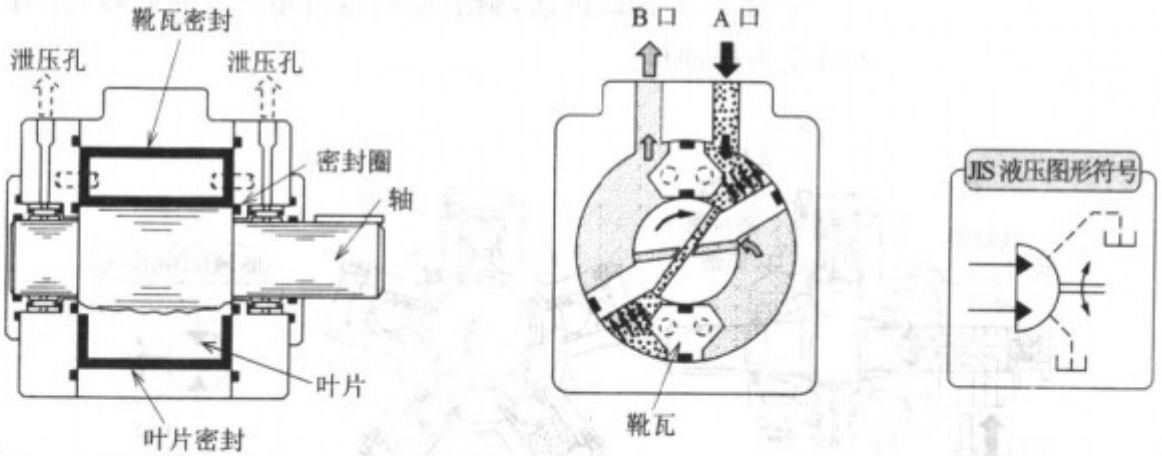


图5.52　摆动式液压马达

相关知识



图5.53　家用电梯液压系统

◆ 如何用液压缸获得更大的推力

为了在液压缸中获得更大的推力，可以采用增大缸体的面积、提高压力等多种方法实现。要提高速度则必须增大流量，而要获得大流量就必须使用大型液压泵和阀门等。因此，可以采用减小液压缸的面积来提高压力的方法实现。

◆ 住宅用电梯

近年来，住宅中应用的控制机械越来越多。由于住宅空间的增大、人口老龄化及身体残疾等原因都会造成上下楼梯的不便，为此，住宅中也需要电梯。图5.53所示为一种以液压系统为驱动源的家用电梯。

例 题

液压缸如图 5.54 所示，若工作油的流量 Q_1、Q_2 均为 1000cm³/s，活塞杆伸出的速度为多少？活塞杆的缩回速度为多少？

设液压缸的内径 D 为 40mm，活塞杆的直径 d 为 16mm。

答　液压缸的速度 $V_1=\dfrac{\text{流入油量 } Q_1(\text{cm}^3/\text{s})}{\text{缸体 A 侧的截面积 } A(\text{cm}^2)}$

活塞杆的伸出速度 V_1 为：

$$V_1=\frac{Q_1}{A}=\frac{Q_1}{\frac{\pi}{4}D^2}=\frac{1000}{\frac{\pi}{4}\times 4^2}=79.6\ (\text{cm/s})$$

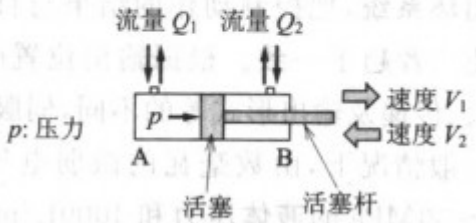


图 5.54　液压缸

活塞杆的缩回速度 $V_2=\dfrac{\text{流入油量 } Q_2(\text{cm}^3/\text{s})}{\text{缸体 B 侧的截面积 } B(\text{cm}^2)}$

$$V_2=\frac{Q_2}{B}=\frac{Q_2}{\frac{\pi}{4}\times(D^2-d^2)}=\frac{1000}{\frac{\pi}{4}\times(4^2-1.6^2)}=94.8\ (\text{cm/s})$$

篇 外 话

虚拟现实

具有虚拟现实感（假想现实感）的机械和装置在各领域中得到了广泛关注。在各地的游乐场和主题公园的游艺机械上，设置能够虚拟体验的装置受到了游客的普遍欢迎。有些游览车、摇摆椅型和摇摆床型的虚拟体验装置（见图 5.55）中也使用了液压执行装置。

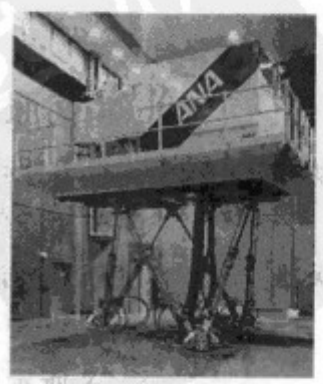


图 5.55　摇摆床型虚拟体验装置

18　液压伺服系统

要　点

液压伺服系统在飞机、船舶、军工等领域的应用由来已久。近年来，作为一般性的技术已广泛应用于工业机器人、主轴旋转控制、机床工作台进给及各种试验装置等。

解　释

伺服系统

伺服系统

伺服系统就是以机械的位置作为被控量，能跟随设定值的任意变化的自动控制系统。通常认为伺服系统是一个

反馈闭环系统

反馈闭环系统，把控制动作的结果与目标值相比较，并通过调节使二者趋于一致。根据输出位置的检测方法和系统内的放大、传递及输出形式等的不同，伺服系统有很多种类型。

一般情况下，由数毫瓦的微弱电气输入信号就可以控

液体压力　流量

制 20～30MPa 的**液体压力**和 4000L/min 的**流量**。

液压伺服系统的基本结构如图 5.56 所示。它是由液压马达、液压缸等执行装置和伺服阀门、位置传感器、伺服放大器等基本环节构成。

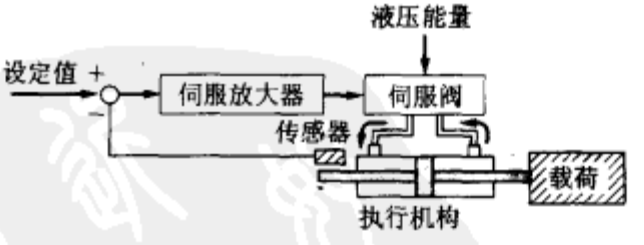


图 5.56　液压伺服系统的构成

伺服阀的结构

力矩电动机

力矩电动机由上下磁极、磁铁、衔铁、线圈、喷嘴、挡板及控制弹簧等构成，如图 5.57 所示。图中加有喷嘴挡板的

油压放大器

部分称为油压放大器。伺服阀的动作原理如下。

① 产生与线圈电流成正比的力矩，使衔铁发生如图 5.58 所示的位移。

② 由喷嘴和挡板机构将力矩电动机变换的机械位移转换并放大成液压力。

③ 将经过喷嘴和挡板机构变换后的液压力传导到阀芯两端，阀芯根据这个液压力的变化产生位移，控制图 5.59 中的各油口的开、闭动作。

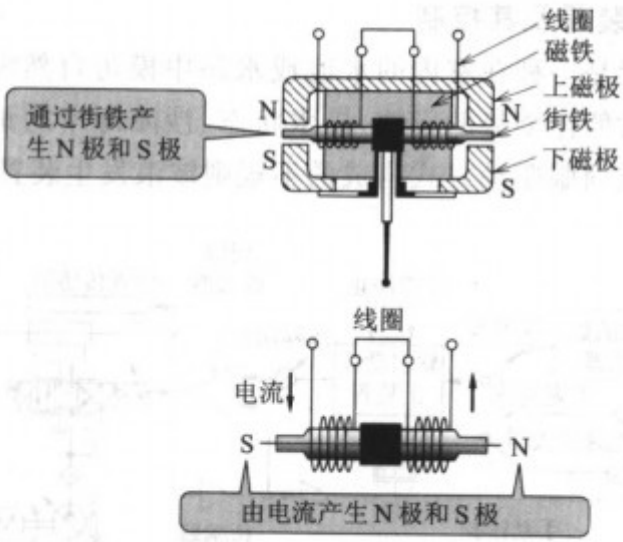


图 5.57 力矩电动机的结构

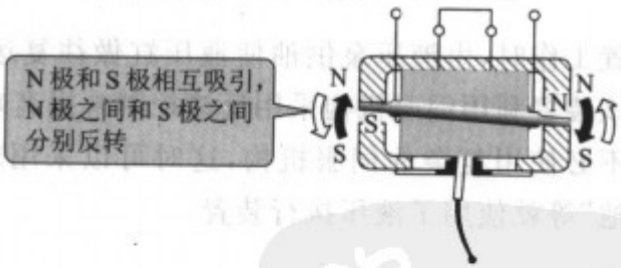


图 5.58 衔铁的动作

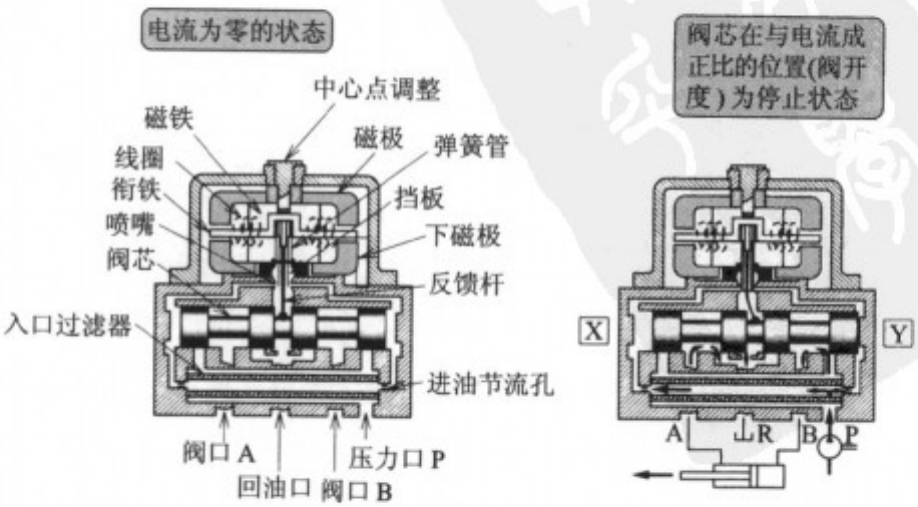


图 5.59 伺服阀的状态

相关知识

◆ 波浪发生装置及其控制

波浪发生装置是一种在室内的水池或水路中模仿自然海浪的装置。这种装置可用于波浪对船体姿势的影响、排水状态、沙滩海岸的地形变化等方面的实验研究。由液压伺服驱动方式构成的不规则波浪发生装置如图 5.60 所示。

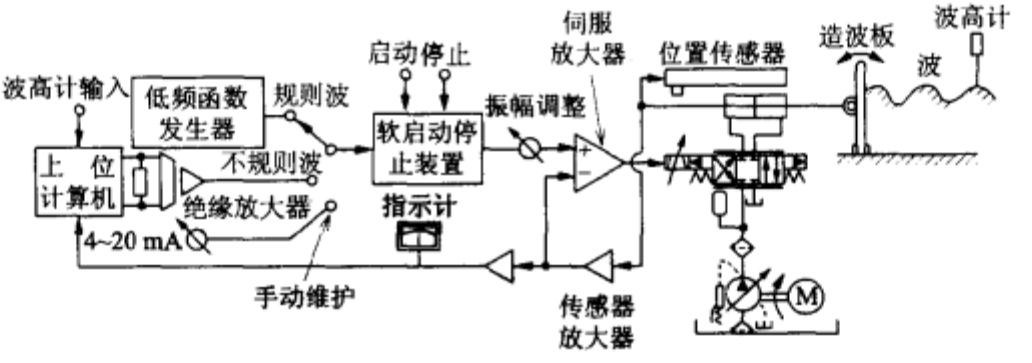


图 5.60　波浪发生装置及其控制

波浪发生装置工作时，由液压泵供油使液压缸做往复运动，驱动造波板使水中产生波浪。该装置利用伺服机构采用反馈控制来提高响应特性。

有些情况下不必使用复杂的伺服机构，这时可以采用较为简单的驱动装置，如“波浪游泳池”等就使用了液压执行装置。

篇外话

薄板的形状控制

压力传感器通过放大器把压力转换成与之成正比的电压或电流信号输出。图 5.61 所示为一个轧制轧辊凸面的压力控制装置。

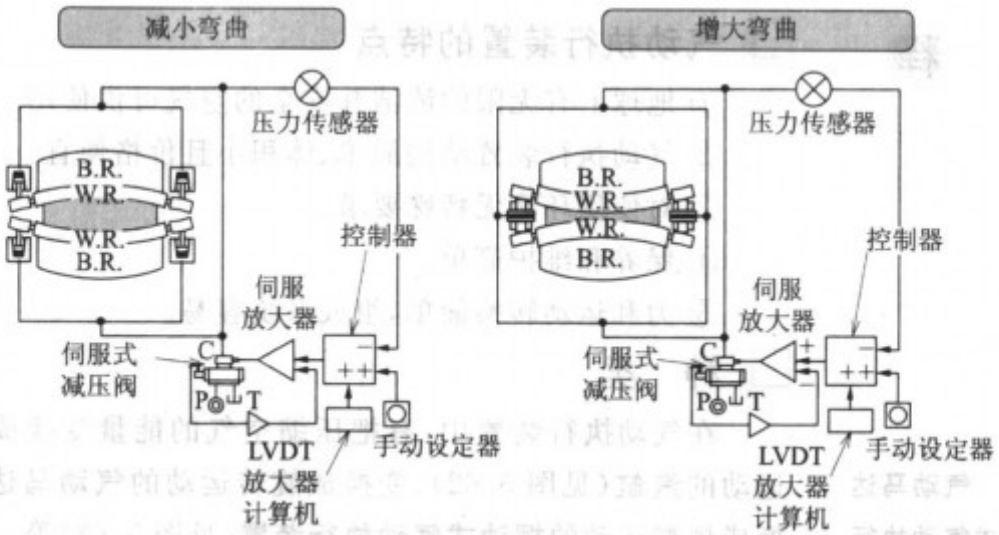


图 5.61 轧制薄板的形状控制

19　气动执行装置

要　点

所谓气动执行装置是指把压缩空气的能量变换成直线、旋转或摆动等运动来驱动机械做功的装置。

解　释

气动执行装置的特点

① 地球上有无限的清洁并安全的空气可供使用。

② 气动执行装置结构简单、体积小且价格便宜。

③ 对使用环境无特殊要求。

④ 保养和维护简单。

⑤ 力和运动转换简单，组成系统容易。

种　类

在气动执行装置中，有把压缩空气的能量变换成直线运动的**汽缸**（见图5.62）、变换成旋转运动的**气动马达**和变换成摇摆运动的**摆动式气动执行装置**（见图5.63）等。

汽缸　气动马达

摆动式气动执行装置

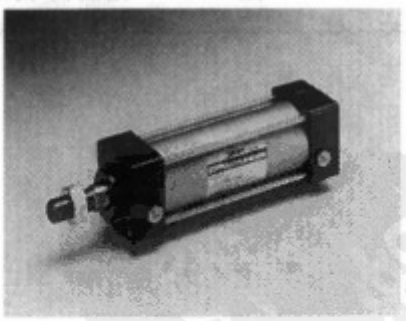


图5.62　汽　缸

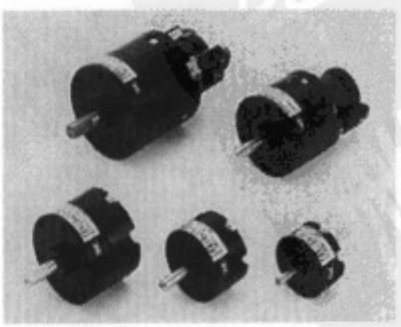


图5.63　摆动式气动执行装置

主要用途

气动执行装置广泛应用于各种工业机械和车辆、机器人、气动工具及测量仪器等领域。

相关知识

◆ 净化室

在电子工业、精密机械工业、药品和食品制造等领域，要求具备清洁度较高的工作环境。在这些制造领域，大气中悬浮着的无数尘埃将对产品的合格率和可靠性产生很大的影响，因此要求有高清洁度的净化室。

◆ 表压与绝对压力

压力测量时一般以大气压作为基准，以大气压作为 0 点测定的压力称为“表压”。以完全没有压力的真空状态作为 0 点测定的压力称为“绝对压力”，如图 5.64 所示。

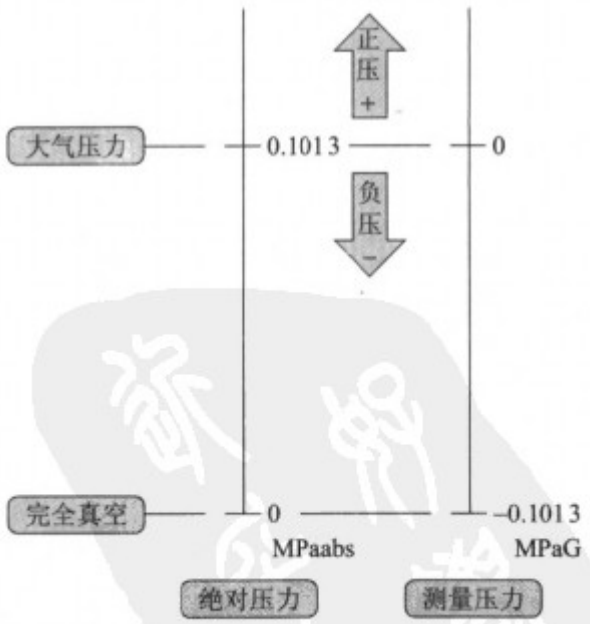


图 5.64 绝对压力与测量压力

例 题

当表压为 0.3MPa 时，其绝对压力为多少？

答 绝对压力＝测量压力＋大气压力，所以

0.3＋0.101 3＝0.401 3（MPa）

篇外话

压缩空气的高压化趋势

压缩空气的压力可以分成低压(1MPa以下)、中压(1～3MPa)和高压(3～5MPa)等。目前，正在研究开发15～20MPa空气压力装置的实用技术。

通过提高压缩空气气源的压力，可减小执行装置的体积和质量，并降低成本，而在高压下如何保证设备及人身安全则是压缩机等技术要研究的课题。

20 气动执行装置的工作原理

要 点

气动执行装置的工作原理有如下两种方式。

① 汽缸内供给压缩空气，使活塞做往复运动，由活塞杆将动力传出，带动机械做功。

② 向机体的封闭腔内供给压缩空气，带动叶轮旋转，从而获得旋转运动。

解 释

特 点

气动执行装置的优点是能够把压缩空气的能量简便地转换成机械运动。其缺点是难以进行精确的速度控制和位置控制，并且容易受负载变化的影响。

气动执行装置的操作方法简单，通过在其结构和回路上的不断改进来适应各种负载条件，因此应用广泛。

汽 缸

所谓汽缸，就是向缸体内供给压缩空气，使活塞做往复运动，由活塞杆将动力传出，带动机械做功。它可分为单向式和双向式两种。

单向驱动汽缸 单向驱动汽缸由在缸体内滑动的活塞和活塞杆构成。其工作原理如图 5.65 所示。

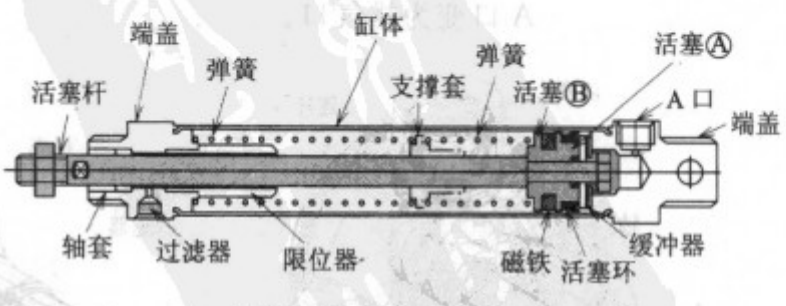


图 5.65 单向驱动汽缸

① 从 A 口供给压缩空气，推动活塞前进，使活塞杆上产生推力。

② 依靠内部安装的弹簧力使活塞复位。

双向驱动汽缸 双向驱动汽缸也是由在汽缸内滑动的

活塞及活塞杆构成。其工作原理如图 5.66 所示。

① 从 A 口供给压缩空气，推动活塞移动，排气室的压缩空气从 B 口排出，从而使活塞杆上产生推力，向前运动。

② 反之，若从 B 口供给压缩空气，从 A 口排出空气，则使活塞向后移动。

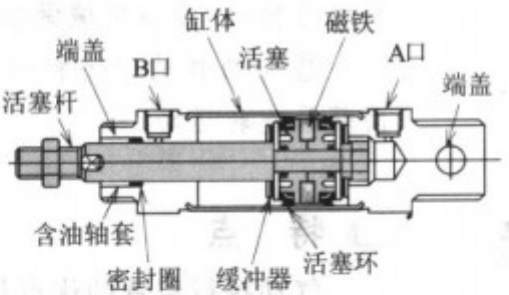


图 5.66　双向驱动汽缸

气动马达

气动马达是指供给压缩空气后可以获得连续旋转运动的装置。它有**活塞式**(如图 5.67 所示)和**叶片式**(如图 5.68 所示)等几种形式。**径向活塞式气动马达**的工作原理如下。

活塞式　叶片式

径向活塞式气动马达

① 各活塞与曲轴由连杆连接，与转轴为一体的旋转阀门把从 A 口进入的压缩空气依次供给各活塞。

② 由压缩空气驱动的活塞推动曲轴产生旋转力矩。

③ 另一侧的 B 口作为排气口。

④ 若从 B 口供给压缩空气，则**气动马达**反向旋转，此时 A 口变为排气口。

气动马达

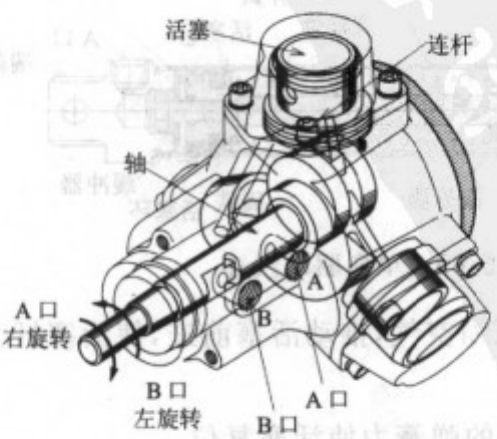


图 5.67　径向活塞式气动马达

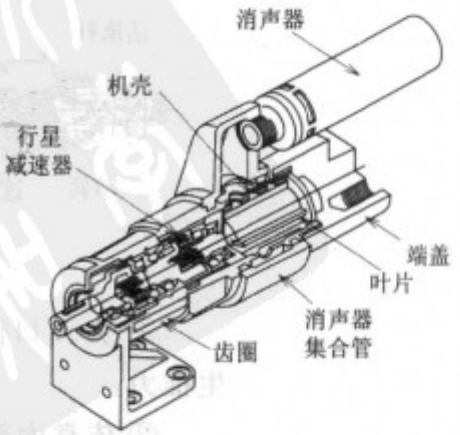


图 5.68　叶片式气动马达

摆动气动执行装置

叶片式
齿条齿轮式

摆动气动执行装置一般以小于360°的角度摆动。根据其结构的不同，它可分为**叶片式**（见图5.69）和**齿条齿轮式**（见图5.70）等。

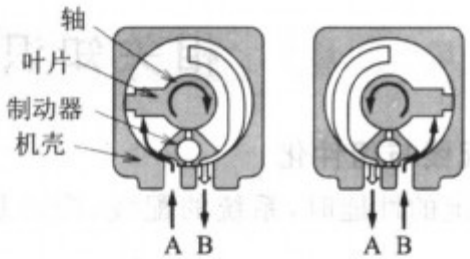


图5.69 摆动气动执行装置（叶片式）

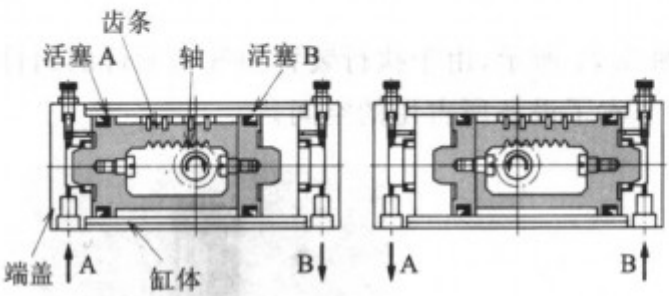


图5.70 摆动气动执行装置（齿条齿轮式）

单叶片式 单叶片式摆动气动执行装置由在机壳内侧滑动的叶片、与叶轮相连的轴及限位器等构成。其工作原理如下。

① 从A口供给压缩空气，推动叶片转动，在轴上产生力矩。

② 排气室的压缩空气从B口排出，转轴向顺时针方向旋转。

③ 叶轮碰到限位器后停止。

④ 若从B口供给压缩空气，则气动马达向逆时针方向旋转。

齿条齿轮式 齿条齿轮式摆动气动执行装置由汽缸、在缸体内滑动的两个活塞、位于两活塞之间的齿条及转轴等构成。其工作原理如下。

① 从A口供给压缩空气，推动活塞A，通过齿条齿轮副在齿轮轴上产生力矩。

② 排气室的压缩空气通过B口排出，转轴向顺时针方向旋转。

③ 当活塞B碰到端盖停止时，转轴也停止转动。

④ 若从B口供给压缩空气，则转轴向逆时针方向转动。

相关知识

◆ 节省配线与组件化

在提高系统的性能时，系统的配线、配管量将随之增大，成本也会随之大幅度增加。

在配管工程中，采用单接式软管等技术可以缩短工时，变更容易，节省配线。

如图5.71所示，由于执行装置和气动元件的组件化，既缩短了系统的制造工期，又节省了设备所占用的空间。

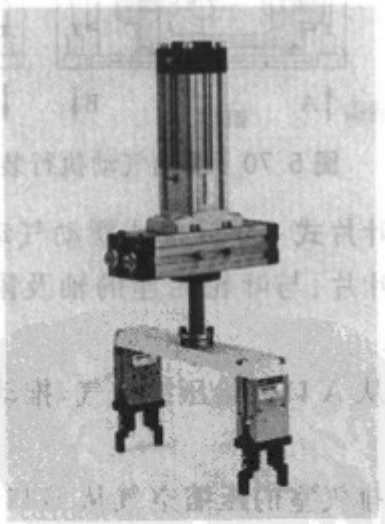


图5.71　气动执行装置的组件化实例

例　题

[1] 如图5.72所示，在直径为20mm的汽缸中，压缩空气的压力为0.5MPa，问汽缸的输出推力F(N)理论上为多少？

已知活塞杆的直径d为8mm。

答　直径为20mm的汽缸，其A侧的截面积$A(mm^2)$为：

$$A=\pi\times\frac{D^2}{4}$$

汽缸 B 侧的截面积 $B(mm^2)$为：

$$B=\pi\times\frac{(D^2-d^2)}{4}$$

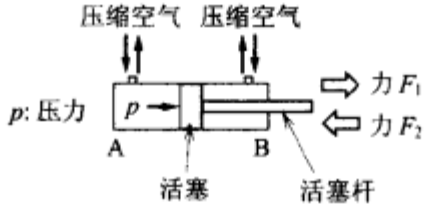


图 5.72　例题图

活塞杆前进时，推出侧的输出推力 F_1 为：

$$F_1=p\times A=0.5\times\pi\times\frac{20^2}{4}=157\ (N)$$

活塞杆后退时，缩回侧的输出推力 F_2 为：

$$F_2=p\times B=0.5\times\frac{\pi(20^2-8^2)}{4}=132\ (N)$$

汽缸直径的选择方法如下：

取 D 为汽缸直径(mm)，p 为工作压力(MPa)，F 为汽缸输出推力(N)，η 为汽缸效率(通常为 80%)。

汽缸的理论输出推力 F(N)为：

$$F=Ap$$

汽缸的实际输出推力 F'(N)为：

$$F'=\eta Ap=\eta\times\pi\times D^2\times\frac{p}{4}$$

汽缸的直径 D(mm)为：

$$D=\sqrt{\frac{4}{\pi\eta p}\cdot F'}$$

[2] 当工作压力为 0.5MPa 时，若所需输出推力为 500N，问汽缸的直径应取多少？设汽缸的效率为 80%。

答　汽缸的直径 D 可由下式计算：

$$D=\sqrt{\frac{4}{\pi\times0.5\times0.8}\times500}=39.9\ (mm)$$

根据汽缸直径的标准，取汽缸直径为 40mm。

题外话

执行装置常用名词术语

① 标准状态：温度为20℃、绝对压力为760mmHg(0.101MPa)、相对湿度为65%的空气状态。

② 空气量：将单位时间内流过的压缩空气换算成标准状态下的空气体积。

③ 空气消耗量：将气动装置或系统在某一条件下所消耗的压缩空气量，换算成标准状态下的单位时间的空气消耗量。

④ 分离水：在气压器装置或管路内处于流动状态或沉淀状态的水或者油水混合液。

⑤ 残压：在切断压力供给后，管路系统或装置内残存的不希望有的压力。

⑥ 背压：作用于管路的排气侧或与压力工作面相对面的压力。

⑦ 响应时间：从阀门或管路中施加输入信号起至达到输出规定值为止所需要的时间。

⑧ 汽缸的输出力：由活塞杆传递的机械力。

⑨ 输入压力：装置输入端的压力。

⑩ 输出压力：装置输出端的压力。

⑪ 配管连接口径：装置上用于管路连接的接口直径。

21 气动执行装置的控制

要 点

气动执行装置的控制是以驱动装置的控制为主的对气动系统的控制，按被控驱动装置的功能和控制方法可分为多种控制方式。

解 释

气动装置的构成

将通过空气压缩机获得能量的压缩空气输入到汽缸或气动马达等装置中，这种压缩空气的能量就可以转换成机械功。

气动装置中使用的设备主要有以下几种。

驱动装置(执行装置)

① **驱动装置(执行装置)**：利用空气压力的能量做机械功的装置，有汽缸、气动马达、摆动气动执行装置等。

控制装置(空气阀门)

② **控制装置(空气阀门)**：控制压缩空气流动的方向、流量和压力变化的装置，有电磁阀、手动阀门和执行器驱动的自动阀门等。

空气质量调整装置(F. R. L 组件)

③ **空气质量调整装置(F. R. L 组件)**：用于压缩空气状态的调整，有过滤器、调节器和润滑器等。

辅助装置(附件)

④ **辅助装置(附件)**：为了保证设备使用方便和系统的安全而设置的附件，包括传感器、开关、减震器、液压制动缸、接头和仪器仪表等。

真空发生装置

⑤ **真空发生装置**：利用空气的流动来产生真空的装置，有真空泵和喷射泵等。

气压发生装置

⑥ **气压发生装置**：将空气压缩以获得压缩空气的装置，有空气压缩机、储气罐和冷却器等。

⑦ 其他辅助装置。

装置的选用

将 F. R. L 装置、气阀、调整器、汽缸气动装置组成气动系统。由于各种装置有多种型号和尺寸，如何选择其中最为合适的型号和尺寸来构成系统是十分重要的。

气动系统的基本使用方法

图 5.73 所示为一般的气动装置的组合示例。此外还有其他的各种装置，可根据工作的需要选择装配这些装置。

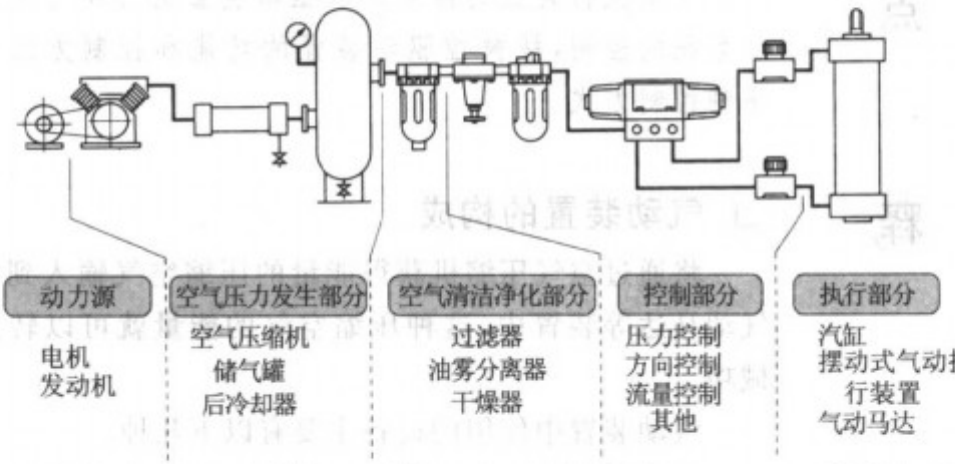


图 5.73　一般气动装置的组合示例

流量控制

利用空气压力时，必须对空气的流量进行控制。在气动回路中安装流量控制阀，用于控制汽缸活塞的速度，并可实现对气动回路中气压信号的滞后控制。流量控制的方法有以下几种。

固定节流节流阀　① **固定节流**：控制流量为恒定值。

速度控制阀　② **节流阀和速度控制阀**：可手动调节流量。

缓冲阀　③ **缓冲阀**：由机械自动调节流量。

相关知识

◆ 调速阀

调速阀的结构如图 5.74 所示，将节流阀与单向阀合为一体，可用于气动系统中执行装置的速度控制。通过调节位于阀芯上的螺钉来调节阀门的开度进而调节流量。

◆ 比例控制阀

比例控制阀分为流量比例控制阀和压力比例控制阀。这种控制阀是可以实现流量和压力无级变化的电磁阀。图 5.75 所示为一种采用 PWM 方式的压力比例控制方法。

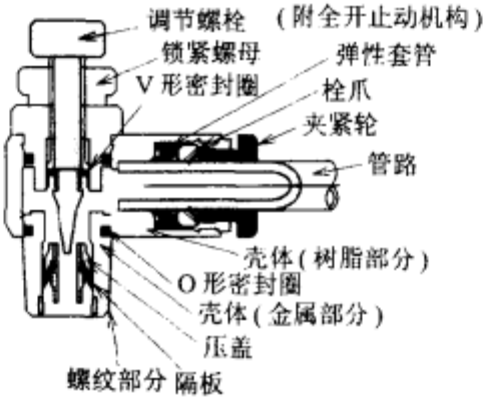


图 5.74　调速阀

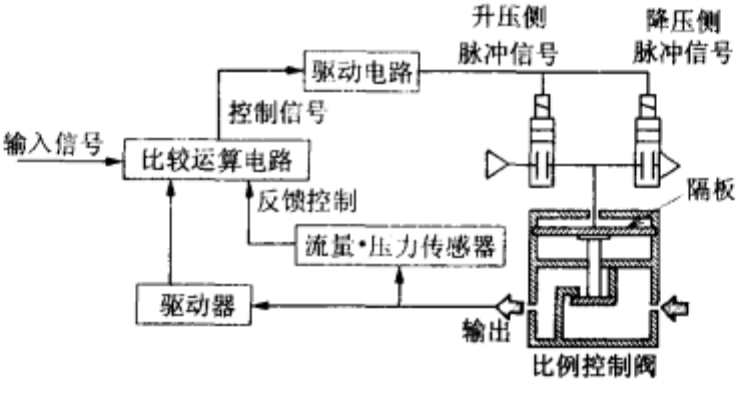


图 5.75　PWM 方式比例控制阀

◆ 气动执行装置的应用实例

自动窗帘　自动窗帘采用无杆汽缸直接拉引窗帘实现开、闭功能。图 5.76所示为应用在仓库、工厂的实例。

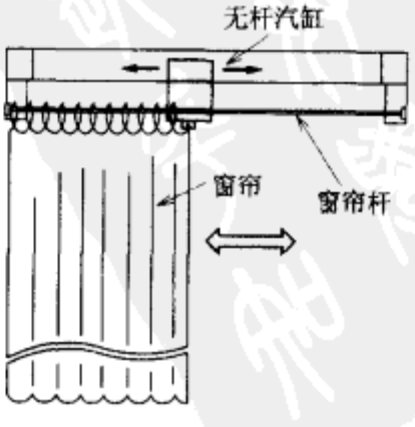


图 5.76　自动窗帘示意

由双杆汽缸构成的气动手　使用尼龙带和双杆汽缸(见图 5.77)构成的气

动机械手如图5.78所示。即使工件的形状或位置存在偏差，气动手也能灵活适应。把工件放置在尼龙带和V形块之间，由双杆汽缸推动V形块前进，将工件推至尼龙带处并夹紧。

抓放机械手 图5.80所示为使用双杆汽缸和气动夹具(见图5.79)构成的抓放机械手的应用实例。图5.81所示为复动式气动夹具的结构。

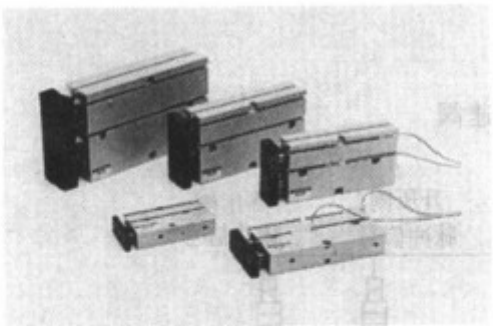


图5.77 双杆汽缸

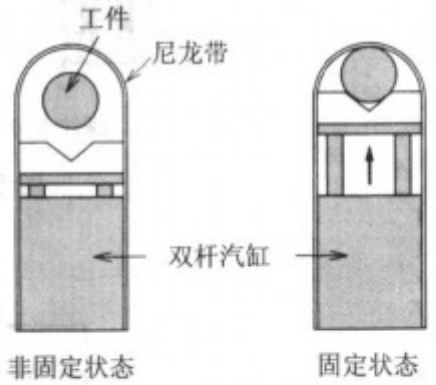


图5.78 使用双杆汽缸的气动机械手

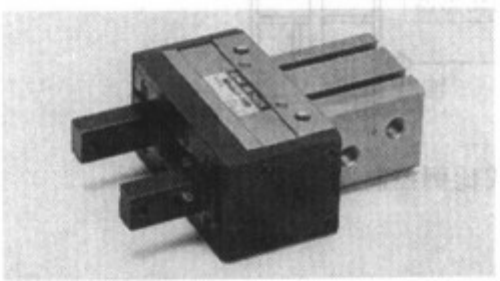


图5.79 气动夹具

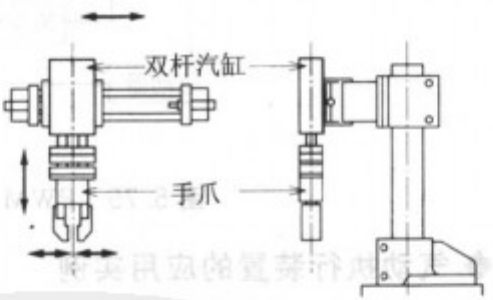


图5.80 抓放机械手

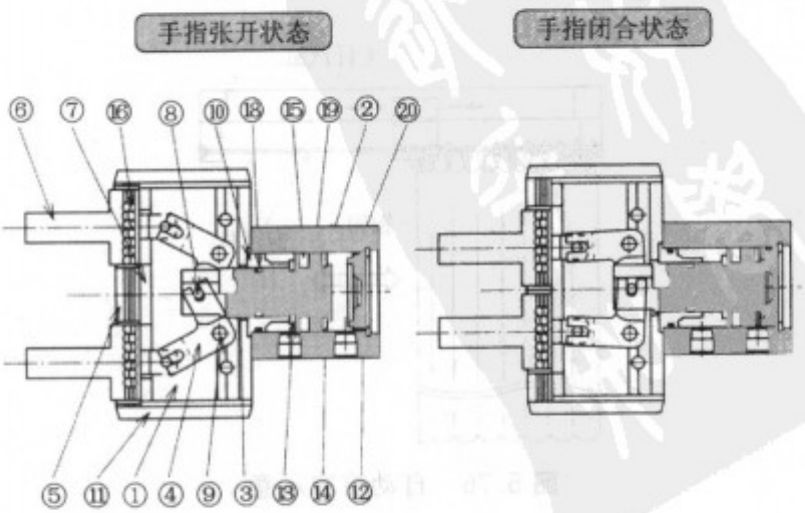


图5.81 复动式气动夹具的结构

序号	零件名称	序号	零件名称
①	机体A	⑪	机壳
②	机体B	⑫	端盖
③	活塞	⑬	风门
④	杠杆	⑭	顶风门
⑤	导轨	⑮	磁铁
⑥	手爪	⑯	滚柱
⑦	导轨座	⑰	C形挡圈
⑧	销轴	⑱	活塞杆密封圈
⑨	杠杆轴	⑲	活塞密封圈
⑩	衬套	⑳	密封圈

图 5.81 复动式气动夹具的结构(续)

电车门的开、关 电车上使用了许多气动装置，车门的开与关就是其中的一种。这是一种通过汽缸的伸缩与杠杆或曲柄组合的机构。

气动执行装置的其他应用举例 图 5.82 和图 5.83 中介绍了两个这方面的应用实例。

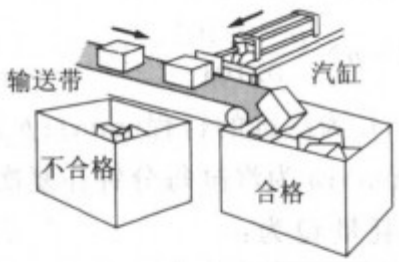


图 5.82 物品的分检



图 5.83 输送线上的翻转装置

◆ 真空吸盘的结构

在洗手间或厨房中常使用一种橡胶制的吸盘，若将它往墙壁或其他平面上一按压就会吸在上面。这是由于橡胶吸盘的空气被压出而处于真空状态，

橡胶吸盘的外侧大气压与内侧真空的压差产生很强的吸力。将这种原理应用于装卸、搬运作业(见图 5.84)时,可以减轻劳动强度并易于实现自动化。

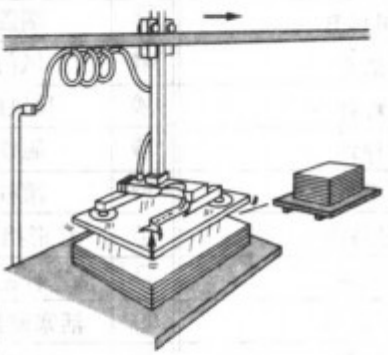


图 5.84 真空吸盘的应用例子

例 题

使直径为 40mm、行程为 50mm 的汽缸在 0.5MPa 的空气压力下每分钟往复 10 次,问汽缸的空气消耗量为多少?

答 空气消耗量 Q 可用下式求出:

$$Q=\frac{\pi}{4}D^2\times L\times 2\times n\times\frac{p+0.101}{0.101}\times 10^{-6}$$

式中,D 为汽缸直径(mm);L 为汽缸的行程(mm);p 为汽缸空气压力(MPa);Q 为汽缸的空气消耗量(L/min);n 为汽缸每分钟往复次数(次/min)。

根据上式求得空气消耗量 Q 为:

$$Q=\frac{\pi}{4}40^2\times 50\times 2\times 10\times\frac{0.5+0.101}{0.101}\times 10^{-6}$$

$$=7.48\ (\text{L/min})$$

题外话

空气消耗量

在选择空气压缩机时,必须求出汽缸的空气消耗量与从阀门到汽缸管路部分的空气消耗量之和。如果再考虑各部分空气的损失,总的空气消耗量应为上述计算值的 1.5 倍左右。

第6章

计算机技术

● 责任编委
樱井 诚
● 执 笔
福田 守

提到计算机，从能够高速处理的计算机到可嵌入到全自动洗衣机等家用电器中的单片机，其应用范围非常广泛。尽管这些计算机在性能上存在天壤之别，但在基本的工作原理上却没有本质的不同。

计算机相当于机电一体化产品的大脑，在这一章中将要学习计算机的一些相关技术。

本章将介绍计算机的基本要素CPU、存储器、I/O端口、微型计算机与控制电路间的接口电路等硬件技术，以及机电一体化系统使用的嵌入软件和操作系统等软件技术。并且，以PIC为单片机的具体实例，介绍在竞赛机器人上的应用，希望能够对读者有实质性帮助。

1　控制与计算机

要　点

当今，许多机电系统都是使用计算进行机控制的。家用电器等小规模的系统则是利用微型计算机内部的程序处理从传感器输入信息，再对执行装置(actuator)进行适当的控制。

解　释

计算机控制系统

家电产品、生产用机械、游戏机、机器人和汽车等，人们身边的许多产品都是用计算机控制的机械电子系统。对于机械电子系统，控制所需要的各种信息均是通过**传感器**输入到计算机里的。如图 6.1 所示，将信息输入到计算机，再通过程序进行判断和计算等处理，从而对**执行装置**按其目的进行适当的控制。利用计算机控制的机械电子系统，可以实现更细微的控制，从而生产出性能更好的产品。并且计算机控制能够构建柔性系统，具有对于任务的变化和改进可以通过改变程序来实现的特点。

传感器

执行装置

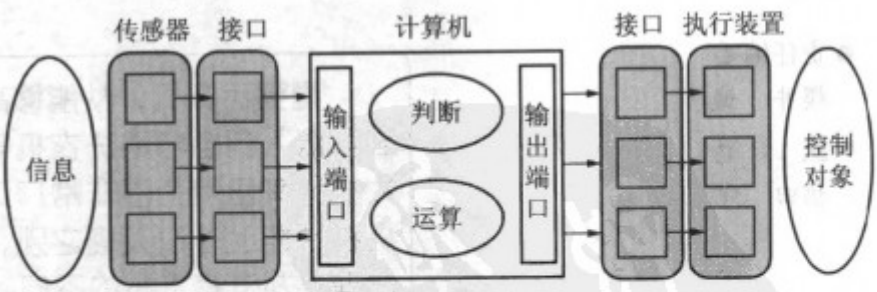


图 6.1　计算机控制系统

家用电器和微型计算机

在录像机、CD 播放器、空调、电饭锅、微波炉、手机、传真机、打印机和数码相机等家用电器的控制中，使用的都是外包装从几毫米到几厘米的微型计算机。这种装入电器内部的控制系统叫做**嵌入式系统**。

嵌入式系统

相关知识

◆ **接　口**

传感器和计算机，或者计算机和执行装置都是靠接口连接的，用来调整电气信号的电平和信号时序。

◆ **输入/输出端口**

计算机中输入端口用于以数字信号的形式获取外部信号，输出端口用于向外部输出信号。可进行传感器的读取和控制执行装置信号的输出。

题外话

微波炉的控制

市场销售的多功能炊具、微波炉等家用电器的基本构成如图 6.2 所示。使用者设定后，食品是用磁电管的电磁波加热还是用加热器的电热加热，程序会选择最合适的调理方法。在食品加工中，根据食物的质量、食物发出的蒸汽量和表面温度，可判断合适的加热时间。这样会使食物处于最佳状态，也使工作时间缩短，而且省电。

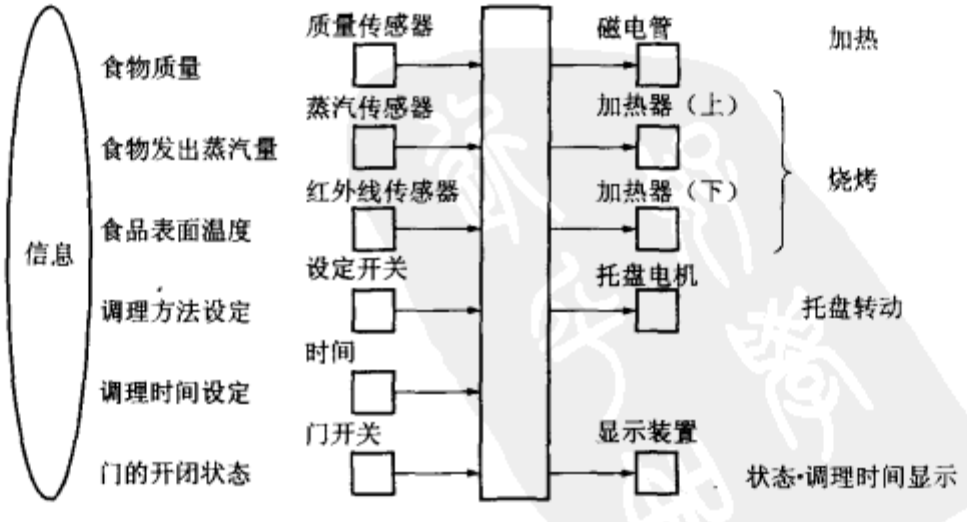


图 6.2　微波炉的构成

2　微型计算机的种类

要　点

微型计算机根据同时处理数据的位数和时钟周期、用途、CISC和RISC、LSI组件包含的功能等不同情况有不同的分类方式。

解　释

微型计算机性能的变迁

微型计算机的性能可用同时处理数据的位数、最大速度(时钟频率)、集成度来评价。1971年Intel公司推出的4位机"4004"是最早的微型计算机，从1974年开始，Intel公司的8080、Zilog公司的Z80、Motorola公司的6800等8位机开始陆续登场。到了1978年，Intel公司的8086、Motorola公司的68000等16位产品已装配到了个人计算机(personal computer)上。此后，Intel公司陆续推出了32位机80286、i386、i486、64位的Pentium等。

微型计算机的用途

在装有32位和64位的高性能微型计算机的个人计算机和游戏机等，可运行OS和应用软件，从而进行图像处理和三维动画处理等。另外，还可嵌入到产品中，用于汽车的发动机控制、高性能机器人的实时处理、手机和数码相机的高速数据处理等。

另外，8位和16位的微型计算机在小规模控制系统中的应用如表6.1所示，表6.1是按性能和用途进行分类的。

表6.1　在小规模控制系统中的应用

家电产品	电视，录像机，CD播放器，红外线遥控器，照相机，空调，电饭锅，微波炉
汽　车	空调控制，车窗控制，雨刷控制，车灯控制，气囊控制
OA机器	打印机，扫描仪，复印机，条形码读码机
通信机器	保密电话，多功能电话，留言电话，FAX，移动电话
工业机器	电机控制，温度控制，FA机器，机床，机器人

相关知识

◆ CISC 和 RISC

微型计算机的处理能力与时钟频率、指令集指令数及一个指令的时钟周期数(CPI:clock Cycle Per Instruction)有关。复杂指令丰富,以处理能力强为目的的微型计算机叫 CISC(Complex Instruction Set Computer)。它可用一个命令进行多项处理,从而减少命令的数量。与其相对的是,一条指令需要的 CPI 越少,硬件逻辑性越好,以执行效率高为目的的微型计算机叫 RISC(Reduced Instruction Set Computer)。

◆ 单片机

使用微型计算机的个人计算机需要存储芯片集和外部存储装置等。用于机器控制的芯片内集成了存储器,接通电源和时钟回路就可以单独工作的微型计算机,叫做单片机(one-chip microcomputer)。典型的单片机如表 6.2 所示。

表 6.2 典型的单片机

系 列	型 号	时钟频率	程序容量	RAM 容量	制造商
PIC	PIC16F84A	20MHz	1792B	68B	Microchip Technology
H8	HD64F3048F	16MHz	128KB	4KB	Renesas(瑞萨科技)
SH	HD64F7045F	28.7MHz	256KB	4KB	
AVR	Attiny26/L	16MHz	2KB	128B	ATMEL

篇外话

H8 微型计算机

H8 是日立制作所和三菱电机的子公司瑞萨公司制造纯国产的单片机。系列为 32～120 管脚的产品群。100 管脚的 HD64F3048F,其内部安装了 CPU H8/300H,时钟周期 16MHz,由 16 个 16 位的通用寄存器、128KB 的 ROM、4KB 的 RAM 构成。同时具有输入/输出端子 70 个,输入专用端子 8 个,10 位 8 通道的 A/D 转换器,8 位 2 通道的 D/A 转换器。广泛应用于各种机器的控制中。

3　微型计算机的基本结构

要　点

微型计算机是由进行输入、输出、存储、运算和控制的各要素构成。通过总线进行各要素之间的信息传递。将需要的程序和数据由CPU从存储器中读取。

解　释

微型计算机的基本结构

微型计算机
CPU　存储器
输出端口
输入端口

微型计算机的基本结构如图6.3所示，它是由**CPU**(Central Processing Unit)、**存储器**、**输出端口**、**输入端口**等构成，并运用集成电路技术将CPU和输入/输出端口LSI化。单片机中还集成了存储器。

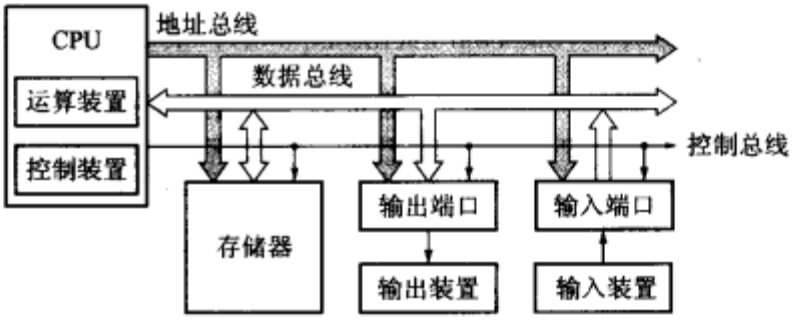


图6.3　微型计算机的基本结构

CPU

CPU是由运算装置和控制装置构成的。将存储器的内容逐一读出，根据控制指令进行运算和数据的输入/输出，进行这种控制的机构称为**控制装置**。

控制装置
运算装置　ALU

运算装置被称为**ALU**(Arithmetic Logic Unit)，用于进行加法和乘法等算术运算和AND、OR等逻辑运算。

总　线

总线是一束CPU与存储器、输入/输出设备交换信息的信号线。总线分为**地址总线**、**数据总线**和**控制总线**。CPU进行数据交换的目标由地址总线指定，地址总线所指定的内存单元和输入/输出端口的数据由数据总线传送。输入/输出时序的控制使用控制总线。地址总线的位数由

地址总线
数据总线
控制总线

可以访问的地址空间的大小来决定。16 位的地址总线可以指示 $2^{16}=65\ 536$ 个地址。

数据总线的位数是 CPU 一次所传送数据的大小，数据总线的位数越大，则传送的效率就越高。通常，当数据总线的位数和 CPU 能够一次处理数据的位数相同时，这个位数就是表示 CPU 性能的位数。由于构造上的制约，也有两者不同的情况。

CPU 的内部结构

CPU 的内部由控制部分、运算部分、指令解析部分、通用和专用寄存器阵列等构成(见图 6.4)。

控制部分和指令解析部分 CPU 将存储器中存储的指令读取到**指令寄存器**(IR)中。**指令解析部分**对 IR 寄存器里的指令进行解释，然后由控制部分生成 CPU 的外部和内部的控制信号。

指令寄存器

指令解析部分

运算部分 运算部分的 ALU 通常对 2 个数据进行运算。其中一个数据存储在**累加器**(ACC)里，运算的结果也写入到累加器中。同时运算的结果将影响**标志寄存器**(FR)状态。

累加器

标志寄存器

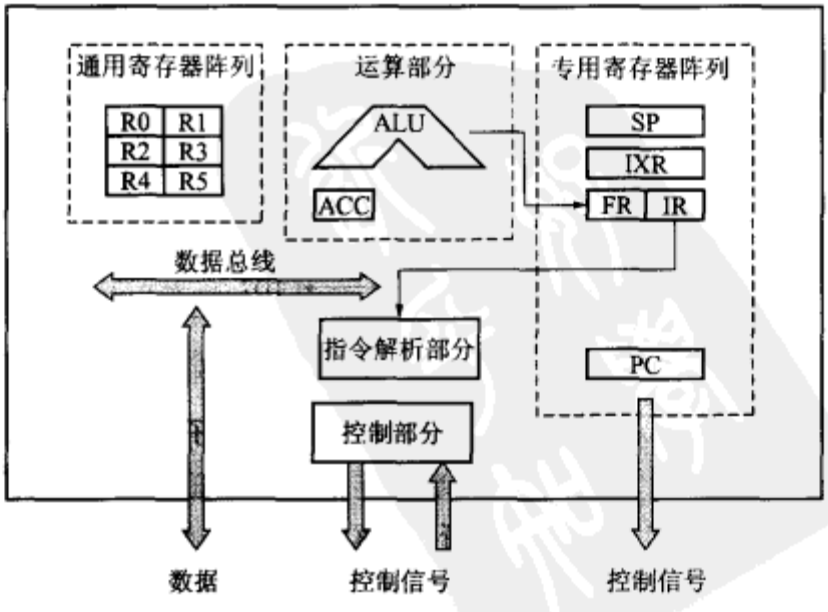


图 6.4 普通 CPU 的内部结构

通用寄存器阵列 在 CPU 内部处理数据时，用来暂时存储和保存数据的装置，叫做**通用寄存器**。对于 CPU 外部

通用寄存器

的存储器里存取必须指定地址，而通用寄存器不用指定地址，直接存取即可，这样可以高速传递数据。CPU 内部有多个通用寄存器。

专用寄存器阵列　专用寄存器是用地址来指定的寄存器，有用来存储下次取指令地址的**程序计数器**(PC)、对堆栈操作需要的**堆栈指针**(SP)、间接寻址需要的**变址寄存器**(IXR)等。这些以及前文提及的 IR、FR 等都属于专用寄存器阵列。

程序计数器
堆栈指针
变址寄存器

CPU 的引脚配置

图 6.5 所示是虚拟的 CPU 引脚的配置，由此可以说明一般 CPU 的使用方法。虚拟的 CPU 是 40 个引脚的 LSI，其内部没有存储器和输入/输出端口。

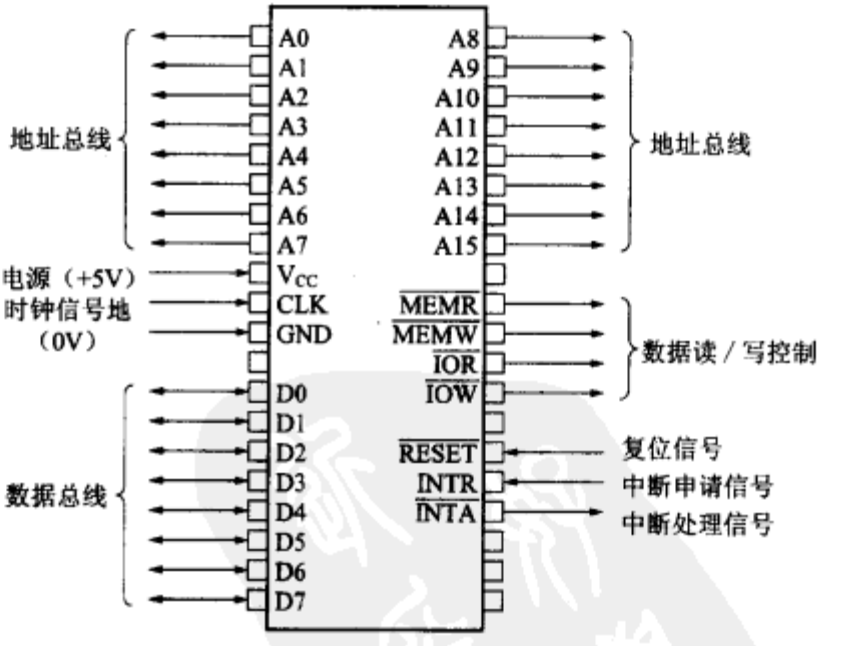


图 6.5　虚拟 8 位 CPU 引脚的配置

总线和闸门信号端子　假想的 CPU 和与存储器、输入/输出端口连接的地址总线是 16 位，数据总线是 8 位。如图 6.5 所示，通常，存储器和输入/输出端口的地址总线、数据总线是共用的。为此，CPU 需要区分访问的是存储器还是输入/输出端口。控制访问时序的信号线 $\overline{\text{MEMR}}$、$\overline{\text{MEMW}}$、$\overline{\text{IOR}}$、$\overline{\text{IOW}}$被称为**闸门信号**。闸门信号的功能如表 6.3 所示。

闸门信号

表 6.3 虚拟 CPU 的闸门信号的功能

引脚名称	功 能
$\overline{\text{MEMR}}$	从存储器里读取数据
$\overline{\text{MEMW}}$	向存储器里保存数据
$\overline{\text{IOR}}$	从输入端口读取数据
$\overline{\text{IOW}}$	向输出端口输出数据

这些闸门信号平时是高电平，低电平表示对应的信号发生，用信号名上的上划线加以区分。

CPU 控制端子 CPU 要准备从外部进行控制的信号线 $\overline{\text{RESET}}$、$\overline{\text{INTR}}$、$\overline{\text{INTA}}$。当 $\overline{\text{RESET}}$ 信号为低电平同时程序计数器被置 0 时，程序重新从 0 号地址开始执行。INTR 是**中断**(interrupt)**信号端子**，从 CPU 的外部强制进行现在执行的程序和预先设定的中断处理程序切换的端子。$\overline{\text{INTA}}$ (interrupt acknowledge)是 CPU 在进行中断处理时通知外部设备的端子，用来进行中断处理时对外部设备进行时序控制。

中断信号端子

电源端子 Vcc 是连接电源(+5V)的端子。GND 是连接地线(0V)的端子。而 CLK 是由外部提供的时钟信号。

以上仅通过虚拟的 CPU 对微型计算机的基本构成进行了说明。机械控制实际上使用的 CPU 也是如上所述，大多都集成了存储器和输入/输出端口，但外形和引脚数也是各种各样的。

4　微型计算机的基本动作

要　点

微型计算机是通过程序对存储器中保存的指令逐一进行读取、解码而运行的。但是，实际上的处理方式有在微型计算机和存储器内部进行数据的传送、进行运算的处理，以及通过外部机器和数据进行的输入/输出处理。

解　释

命令的读取和运行

如图 6.6 所示，在微型计算机内部，存储器中的指令按以下的顺序循环进行。①读取到指令寄存器(instruction register)里；②对指令进行解码；③执行。①叫**取指令**(instruction fetch)；②叫**解码**(decode)；③叫**执行指令**(instruction execution)。

取指令
解码　执行指令

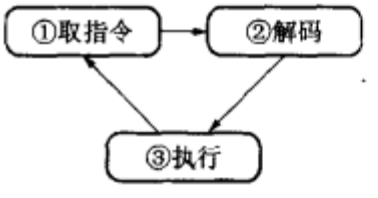


图 6.6　微型计算机的基本动作

取出

取出是指能够按顺序读取存储器中保存的指令群(程序)，对于下一次读取指令的存储器地址由程序计数器保存。每次开始读指令时，**程序计数器**(program counter)的值被加 1，指向下一个指令的存储器地址。指令寄存器里保存读入的指令直到该指令处理结束。对指令寄存器里保存的指令，由**指令解析部分**(decoder)和**控制部分**变换为实际的控制信号。虽然控制部分用于产生硬件的控制信号，但有时也使用被称为**微代码**的程序。

程序计数器

指令解析部分
控制部分
微代码

在指令的执行阶段，主要进行寄存器和存储器间的数据移动和 ALU 的运算。

指令的种类

微型计算机的指令包括数据传送指令、运算指令、输入/输出指令、跳转指令等。这些指令根据微型计算机的不

操作码　操作数

同而异，一般是由如图 6.7 所示的**操作码**和**操作数**构成。

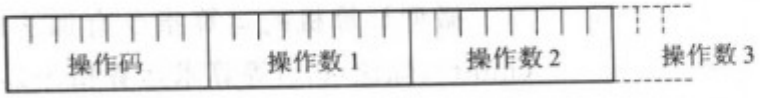


图 6.7　指令的结构

操作码(operation code)　操作码是表示处理内容的代码，也叫指令代码。在图 6.7 中由 8 位构成，可以区别 256 个指令。

操作数(operand)　操作数表示操作码处理的数据部分，也叫做地址部分。

传送指令　传送指令是把数据转移到其他场所，或是进行复制的命令，必须指定数据源(source)和转移的目的地(destination)。它需要指定多个指令操作数，对于寄存器间的传送等，有时在指令操作码中也包含了数据源或转移的目的地。

运算指令　使用传送指令移动数据时要考虑运算的处理。操作数指定了数据的存放地点，有时直接包含运算中必要的数值。

输入/输出指令　数据的所在地或目的地是输入/输出端口的指令，在与微型计算机的外部进行数据输出时使用。

指令集

这些特定微型计算机的所有指令称为**指令集**，表 6.4 所示为指令集的例子。

表 6.4　指令集的例子

	指令助记符	指令功能
传送指令	MOV　R0,A	ACC 的数据送到 R0 寄存器
	MOV　A,address	address 地址的数据送到 ACC
加法指令	ADD　A,address	ACC 的数据和 address 地址的数据相加
	ADD　A,#data	ACC 的数据和 data 相加
输入指令	IN　A,port	port 的数据输入 ACC
输出指令	OUT　A,port	ACC 的数据输出到 port
跳转指令	JP　address	跳转到 address 地址
条件跳转指令	JPZ　address	运算结果为 0，跳转到 address 地址

运算处理

微型计算机的运算指令有加法(add)、减法(sub)、乘法(mult)、除法(div)等算术运算指令以及或(OR)、与(AND)、异或(XOR)、非(NOT)等逻辑运算指令。如图 6.8 所示,要对 ACC(A 寄存器)的数据和操作数指定的数据进行运算,将结果储存到 ACC 里。另外,将运算结果的状态储存到标志寄存器里。

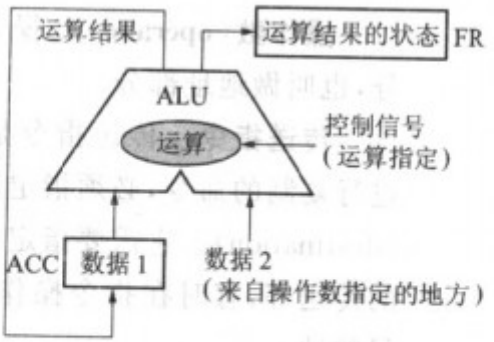


图 6.8 运算处理流程

标志

标志寄存器的各位具有表示运算结果状态的**标志**(flag)作用。一般的标志表示运算结果是 0 还是负值,运算中最高位的**进位**(carry)和**借位**(borrow)等,作为条件跳跃指令的条件。

进位 借位

输入/输出的处理

它是在微型计算机中处理外部设备的输入数据和对外部设备输出处理结果的一般方法。特别是用作机器控制的微型计算机,如单片机的输入/输出功能比较充实。输出/输入的基本方法是,在传送指令中数据的所在地或传送地点使用输入/输出端口(I/O port),根据输入/输出指令进行数据的传送。输入/输出端口的指定方法是,用地址总线和闸门信号指定,或把存储器空间的一部分分配给输入/输出端口。

很多微型计算机的外包装上都标有输入/输出端口的引脚,所以它与外部设备连接非常容易。

题外话

I/O 映射 I/O 方式和存储器映射 I/O 方式

在在输入/输出端口，指定使用地址总线和闸门信号的是 I/O 映射 I/O 方式。在这种方式下存储器空间和 I/O 地址空间是分开的，不会影响存储器空间。另外一种是把存储器空间的一部分分配给 I/O 地址的存储器映射 I/O 方式。这种方式的存储器空间会因为 I/O 地址的占用而减少，但优点是访问 I/O 时可不使用闸门信号，仅使用一般的数据传送指令就可以实现。

5　存储器的功能和种类

要　点

微型计算机进行处理的时候，必须有CPU、输入/输出装置等硬件和程序、数据等软件。软件存放在微型计算机系统内的存储器里，按必要的处理过程进行读出和数据的写入。微型计算机使用了能够直接读出程序的存储装置和半导体存储器(LSI存储器)。

解　释

存储器的作用

存储器内用于存储微型计算机处理所需要的程序和数据等。随着微型计算机程序和数据量的增加，出现了硬盘和CD、MO等记忆媒体，叫做**外部存储器**或是**辅助存储器**。相对而言，微型计算机是直接读/写程序和数据的，由于输入/输出动作中的机械因素，和外部存储器比较起来能够高速传送数据的半导体存储器更适用，外部存储器里记录的程序在实际执行时必须读入半导体存储器中。

外部存储器
辅助存储器

存储器的结构

通常，每个存储器单元对应8bit，能够指定地址对单元进行读、写。根据闸门信号的选择对存储器单元是写入还是读出(见图6.9)。

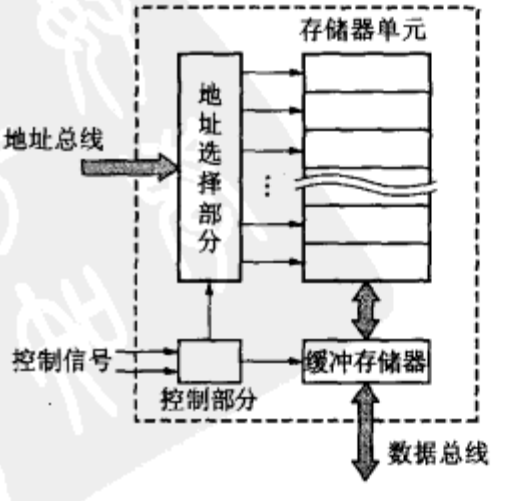


图6.9　一般存储器的结构

访问时间

对于存储器，在读出信号之后指定的地址信息呈现在数据缓冲器上的时间是**访问时间**(access time)。从给出读出信号开始到动作结束，直至可以进行下次读出的时间叫

周期时间

周期时间(cycle time)。

存储器的种类

半导体存储器

ROM　RAM

半导体存储器有不允许更改存储数据的 **ROM**(Read Only Memory)和处理过程中可以自由写入数据的 **RAM**(Random Access Memory)。

通常，ROM 在电源断开后存储的内容不会丢失，接通电源后仍可执行存储的程序。与其相对的 RAM，电源断开后存储的内容会丢失，因此 RAM 仅用于保存运行时的变量等数据、程序执行时临时使用的堆栈区域。图 6.10 所示为存储器的种类。

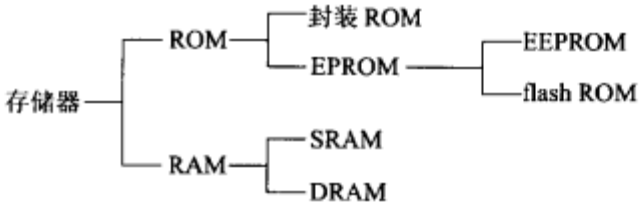


图 6.10　存储器的种类

封装 ROM　在存储器的 LSI 制造过程中，就已经写入程序和数据，因此对其内容不可以更改。用于不需要变化的批量产品中。

EPROM(Erasable Programmable ROM)　使用电子的方法对程序中的数据进行改写，**EEPROM**(Electrically EPROM)及其改良版的 **flash ROM** 被广泛使用。对于 EEPROM，数据变化时必须对整个存储范围进行改写。而 flash ROM 可以以块为单位进行变更，通常更改不会使 flash 存储器退化，使用寿命较长。

EEPROM

flash ROM

SRAM(Static RAM)　它是用触发器记忆数据的 RAM，可以高速读/写。另一方面，它具有集成度低、耗电量大和成本高等特点。如果有电源供给，还可以长期保存存储的内容，所以它常与后备电源配合使用。

DRAM(Dynamic RAM)　使用晶体管和电容器的电荷

再生

对数据进行记忆。在电容器的电荷自然放电而丢失数据前，必须进行再刷新(**再生**)。具有集成度高、耗电量低和成本低等优点。

6 I/O接口

要点

输入/输出(I/O)接口是计算机与外设间交换信息的机构。在微型计算机里的作用是输入/输出接口与数据交换的窗口。通常,在机械控制中,I/O接口与传感器、执行装置之间,有不同种类和特性的I/O接口连接。

解释

I/O接口简介

如图6.11所示,对于使用计算机的机械控制系统,微型计算机提取出由接口传感器操作开关输入的信息,经程序处理后,输出到外部的执行装置和显示装置,以便进行适当的控制。此时,微型计算机与外部机器的电压变换和时序调整使用I/O接口。

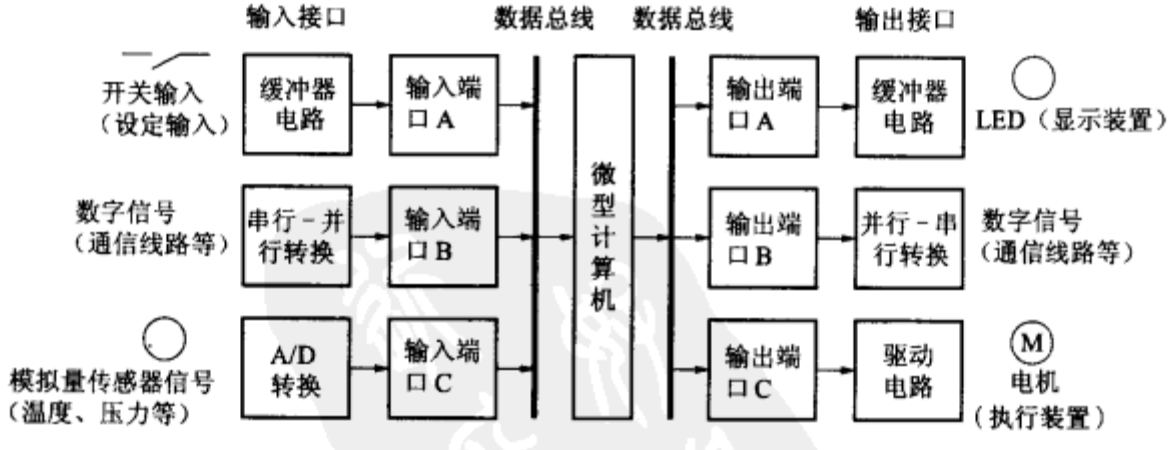


图6.11 I/O接口

I/O端口

微型计算机用地址总线选择I/O端口,用数据总线在它们之间进行数据传送。一般微型计算机的I/O端口中,每个端口由多个位构成。I/O端口分为输入端口、输出端口和输入/输出端口。这些功能是由设定端口的专用寄存器选择,同时,数据总线直接输入/输出信号的电压为低电平,高电平必须要通过数字信号的调整得到。

并行接口

将8bit和16bit等多个信号线合并，并列地进行数据传输，将这种按并行方式传送的接口称为并行接口。因为一次可以传送多位信息，故传送速度较高。相应地，信号线数量的增多也会使连接器和基板的尺寸增大，处理机器内部的信号电缆比较困难。因此常用于传输距离较短和数据信号数量较多的场合。

串行接口

仅采用一条信号线来传送信号，人们将这种传送方式的接口称为串行接口。信号线少，连接器和基板的尺寸也小，相应信号电缆的处理比较容易。但是，这需要用较高的时钟周期来提高数据传送的速率。必须要注意的是，在信号电缆较长时会出现信号畸变。

模拟量I/O

A/D转换

对模拟信号，微型计算机一般的处理方法是使模拟信号转换为数字信号，即**A/D转换**。许多情况下的温度、压力和角度等物理量均是通过传感器得到的。为了将这些信息用微型计算机的程序进行处理，要通过A/D转换器转换为数字信号。A/D转换器按转换方式的分类如表6.5所示。

表6.5　A/D转换的方式分类

	转换方式	特　点
双积分型	由未知电压和标准电压对电容器充/放电，通过充/放电的时间比算出未知电压	• 转换精度高 • 电路简单 • 转换速度慢
逐次比较型	将基准电压驱动的D/A转换器输出的电压和未知电压进行比较，从MSB(最高位)开始顺序地更新逐次比较寄存器的值，使两者之差为零	• 转换精度高 • 转换时间快 • 转换时间依赖外部时钟
反馈比较型	用UP/DOWN(增加/减小)计数器代替逐次比较型的逐次比较寄存器	• 转换速度慢 • 对高速变化的模拟量的跟踪性差
并列比较型	用未知电压和基准电压分压后的模拟量进行比较，通过编码器进行数字化	• 转换速度快 • 需要许多比较器 • 分压电阻影响转换精度

对A/D转换器，使用者可自己设计，但一般是使用半导体化的IC。普通的微型计算机都集成了A/D转换器，用于对机械的控制。

相关知识

◆ 通用接口规格

近些年的个人计算机通常是使用标准化的接口来传送数据。由于使用了通用接口标准，使机械电子系统和个人计算机之间的数据交换成为可能，使微型计算机的应用也日益广泛。通用接口有以下几种类型。

SCSI SCSI是Small Computer System Interface的缩写，是个人计算机和硬盘等外部设备的连接接口，是1986年由ANSI(美国国家标准协会)制定的标准。当时的标准是并行8bit，传输速度为5MB/s，连接机器有0～7种不同的ID。最近，传送数据的速度、可连接的机器数量等规格和性能都在不断提高(见图6.12)。

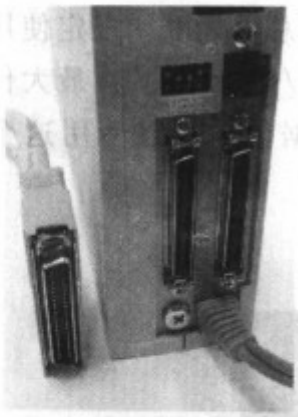


图6.12 SCSI

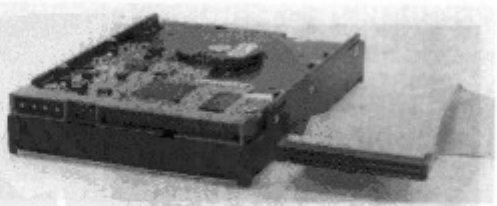


图6.13 IDE

IDE IDE是Integrated Drive Electronics的缩写，是个人计算机内部硬盘使用的标准规格，通过ISA总线连接。用并行16bit进行数据传输。最近，标准有所改进，硬盘以外的设备，如CD-ROM光驱和MO光驱等，也可以连接(见图6.13)。

Centronics Centronics是美国Centronics公司基于打印机使用的接口标准，使用异步并行8bit进行数据传输。控制信号有ACK、STROBE、BUSY，用来进行信号传送的同步(见图6.14)。

RS-232C RS-232C是EIA(美国电子工业协会)制定的用电话线通信的标

准。用于个人计算机和调制解调器等的连接，是传送和接收各1个数据线的串行数据传送方式。除信号线以外还有5个控制信号，由包含地线在内的共8条线构成(见图6.15)。



图6.14　Centronics

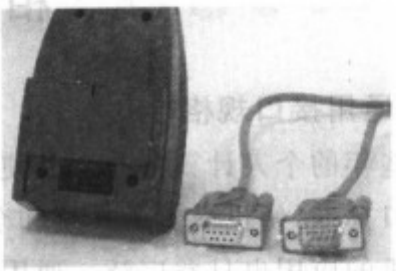


图6.15　RS-232C

USB　USB是Universal Serial Bus的缩写，是以Compaq、DEC、IBM和NEC等厂商为中心制定的串行总线的标准，在连接个人计算机、鼠标及打印机等的外部设备时使用。可以连接最大6层、127台的支持热插拔装置。最初的传送规格为USB1.0，最大传输速度12Mbit/s，而USB2.0的传输速度则是480Mbit/s左右。数码相机的照片也可以通过它进行传送(见图6.16)。

IEEE1394　美国电器电子学会制定的高速串行总线标准。规定使用共有4根数据线和两根控制线，最大传输速度为100Mbit/s。后来又将最大传输速度提高到400Mbit/s，数字摄像机等AV机器的数据传送可以使用这个标准(见图6.17)。



图6.16　USB



图6.17　IEEE1394

7 PIC简介

要　点

PIC是Peripheral Interface Controller的缩略形式，是由美国Microchip Technology公司开发的RISC类型的单片机。PIC在机器控制行业中被广泛应用，其芯片内集成了必要的周边电路，使用简单。作为指令数少、开发环境好的学习用微型计算机受到人们的广泛关注。

解　释

PIC的种类

Microchip Technology公司已开发出如表6.6所示的按性能顺序分类的3个产品系列。

表6.6　PIC产品系列

	命令数	命令长/bit	处理速度/MIPS	引脚数	型　号
基线产品	33	12	5	6～40	PIC10FXXX，PIC12C/FXXX，PIC16C/F5X
中档产品	35	14	5	8～64	PIC12FXXX，PIC16CXXX，PIC16FXXX
高档产品	79	16	10	18～80	PIC18FXXX

基线产品　拥有12位宽的33条命令，是具有输入/输出引脚(pin)和定时器功能及基本功能的产品系列。

中档产品　拥有14位宽的35条命令，是在基线产品功能的基础上扩充了A/D转换器和比较器的模拟输入、USART等的串行I/O功能的产品系列。

高档产品　拥有16位宽的79条命令，大幅地提高了基本处理速度和存储器容量，并增加了模拟输入的通道数。常用于USB等标准接口和汽车的电子控制，是强化了CAN(Controller Area Network)功能等的高性能的产品系列。

PIC的存储器

PIC的LSI内集成了3种存储器，可按目的分别使用。

程序存储器　是存储程序用的存储器，需使用专用的

程序输入设备

程序输入设备进行输入。通常采用 flash 存储器，可擦除和再写入，即使掉电程序也不会丢失。

数据存储器(RAM)　用于运算中间结果，是临时数据存储的存储器，掉电数据会丢失。

EEPROM 存储器　是用来存储程序使用的常量、设定值等数据的存储器。通过专用设备修改，程序的数据可以改写，掉电也不会丢失数据。

flash 存储器(FL)类型

一次可编程(OTP)类型

中档产品

中档产品是 PIC 中最常用的产品。它的程序存储器有两种类型，可以写 1 万次的**flash 存储器(FL)类型**和只能写一次的**一次可编程(OTP)类型**(表 6.7)。

表 6.7　中档产品的型号和基本性能

型　号	引脚数	I/O 引脚数	程序存储器/字	EEPROM 数据存储器/B	RAM/B	A/D 转换	比较器	8 位定时器	16 位定时器	最大时钟/MHz
PIC12FXXX	8	6	1K～2K(FL)	128～256	64～128	0～4	1	1～2	1	20
PIC16CXXX	18～64	6～52	1K～8K(OTP)	—	80～336	0～10	0～2	1～2	0～1	10～40
PIC16FXXX	14～44	12～36	1K～8K(FL)	0～256	64～368	0～14	0～2	1～2	0～1	20

篇外话

PIC 的用途

采用 RISC 结构的 PIC，具有处理效率高、体积小、功耗小、价格低廉和产品线多等优点。在实际的嵌入式系统中，一次可编程产品被广泛使用。如吸尘器、洗衣机、空调的电机控制、红外线遥控器等日常生活用家电产品，鼠标的控制、个人计算机的电源监视等 OA 设备中，遥控门锁装置、电子车窗、雨刷、车灯、车内照明等的控制，汽车导航和音频装置等与汽车相关的设备中。在这些产品中，根据温度和压力及使用者输入的信息，对电机和显示装置等进行模拟开关量的控制，并使用对应的通用接口进行信息传送控制。PIC 在单个芯片上已经具有了这些功能。

8 PIC 16F84A 的构造

要 点

PIC 16F84A 是具有 35 条 14 位宽指令的中档产品，可以在 flash 存储器用专用的程序写入器写入，其包装有 18 管脚，I/O 管脚数是 13 个，集成了时间间隔定时器用的计数器，主要用于面向小规模控制系统的构建。图 6.18 是其外观。

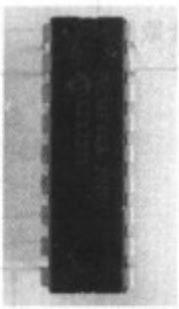


图 6.18 PIC 16F84A 的外观

解 释

哈佛结构

普通的冯·诺依曼结构如图 6.19 所示，PIC 的结构与冯·诺依曼结构不同，是程序存储器和数据存储器分开的哈佛结构，如图 6.20 所示。这种结构的数据总线和程序用总线的宽度不同。在哈佛结构中指令长度是固定的，程序指令的 fetch 动作(取指令)在 1 个指令周期内即可完成，所以能够进行高速处理。将数据和程序分开还可以降低把数据当作程序解释而引起失控的危险性。

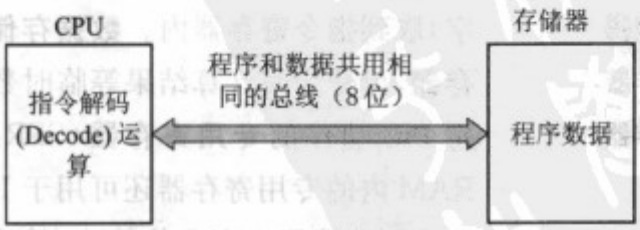


图 6.19 冯·诺依曼结构

PIC 16F84A 的结构

将 PIC 与普通的计算机比较可知，PIC 具有独立的构造。在图 6.21 中展示了 PIC 16F84A 的内部结构。

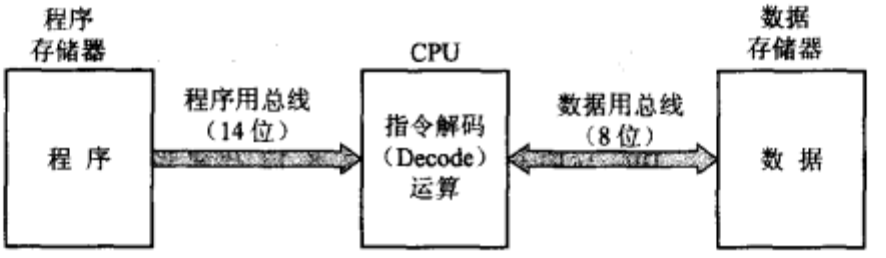


图 6.20　哈佛结构

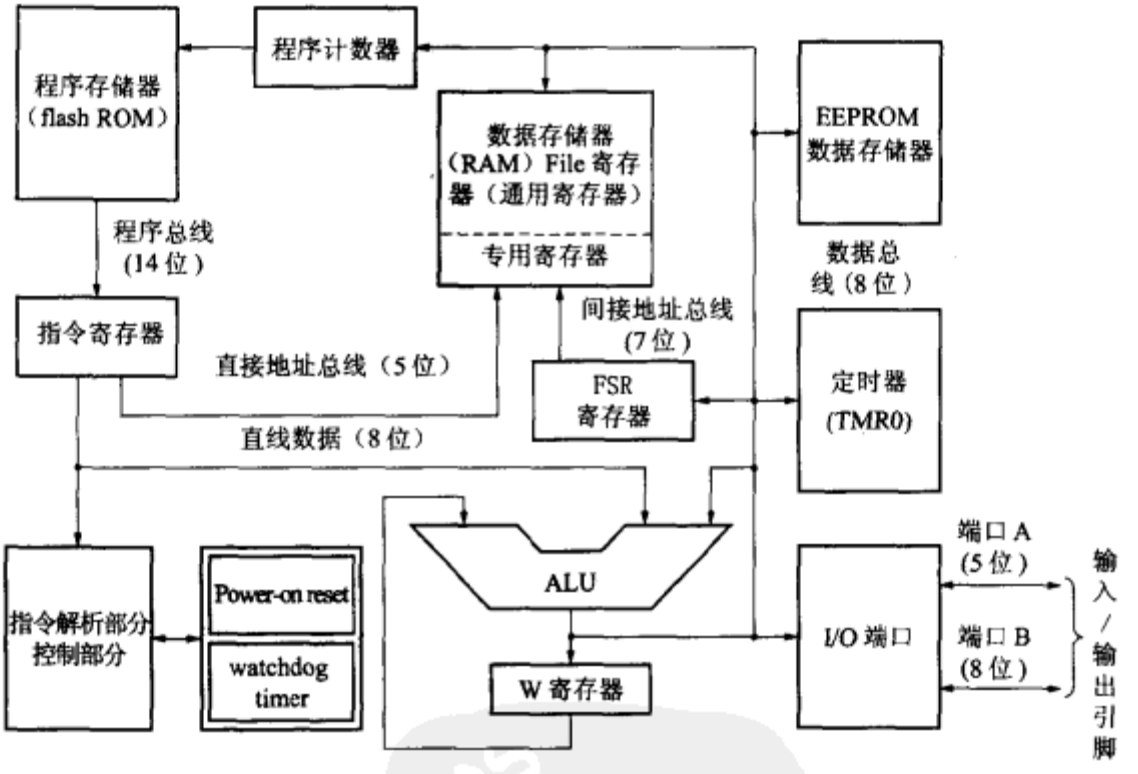


图 6.21　PIC 16F84A 的内部结构

内存　用于保存执行的程序，逐一地将指令（14 位，1 字）取到指令寄存器内。**数据存储器**也被称为 PIC 的**文档寄存器**，可分为将计算结果等临时数据存储的通用寄存器和决定 PIC 动作的**专用寄存器**（SFR：Special Function Register）。RAM 内的专用寄存器还可用于 I/O 端口的输入与输出。

数据存储器
文档寄存器
专用寄存器

I/O 端口　有 5 位输入/输出的端口 A 和 8 位输入/输出的端口 B，用于外部信号的输入/输出。由 RAM 内的专用寄存器 PORTA、PORTB 输入/输出，也可使用端口 A 和端口 B 输入/输出。另外，各个端口的位是输入还是输出，可通过专用寄存器 TRISA、TRISB 来设定。

运算部分 根据运算指令来进行 W 寄存器和操作数的值的运算，将运算的结果存放在 W 寄存器和 RAM 中，由 I/O端口输出。

定时器 内藏的 TMR0 以内部时钟为基准，以一定的时间间隔产生中断，能够准确地测量时间，并可作为动作监视用的 Watchdog 定时器。

指令的传递处理

如图 6.22 所示，PIC 取指令和执行指令，可用同一指令周期执行的传递处理。所有指令都是 14 位的固定长度，所以能够在 1 个指令周期内执行 1 条指令，实现高速度的处理。但是，在中途的分支处理和跳跃指令会改变指令的原有顺序，对于取指令要进行重新设置，所以需要 2 个指令周期才可执行完。

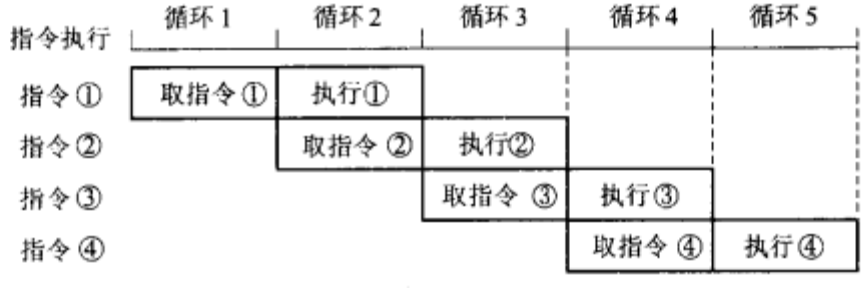


图 6.22 指令的传递处理

引脚的配置

图 6.23 是 PIC 16F84A 引脚的配置，其中各管脚的功能如下。

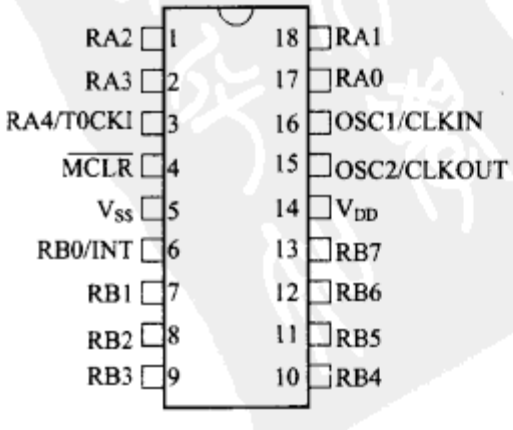


图 6.23 PIC 16F84A 的引脚配置

V_{DD}：+电源(4.0～5.5V)。

V_{SS}：－电源(通常接地)。

$\overline{MCLR}$(master clear)：复位输入(负逻辑)。

OSC1/CLKIN、OSC2/CLKOUT：为了生成时钟频率，与水晶振荡器、陶瓷振荡器等连接，是外部振荡电路的输入端子。

T0CKI：定时器的外部时钟输入端。

RA0～RA4：端口 A 输入/输出端子。

RB0～RB7：端口 B 输入/输出端子。

INT：外部中断输入端子。

9 PIC 16F 的指令体系

要 点

PIC16F 的指令字长是 14 位，根据操作码和操作数的类型，该指令大致分为 4 类。所有的指令都是在第 1 个指令周期（4 个时钟周期）取指令，在下一个指令周期执行指令。

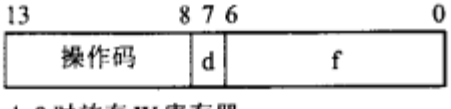
解 释

字节处理指令

字节处理指令是以运算为中心的指令，进行 W 寄存器内容和用 f 表示的通用寄存器的内容的运算。运算的结果，根据 d 的值决定存放在 W 寄存器或者用 f 表示的通用寄存器中（见图 6.24）。

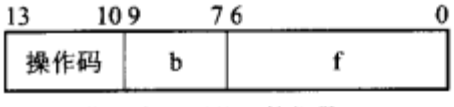
位处理指令

位处理指令是进行位处理的指令，对 f 表示的通用寄存器第 b 位进行处理（见图 6.25）。



d=0 时放存 W 寄存器
d=1 时存放在 f 表示的通用寄存器
f: 共 7 位，表示通用寄存器的地址

图 6.24 字节处理指令的格式

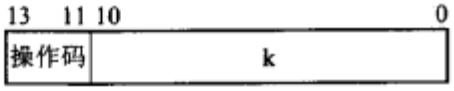


b: 共 3 位，表示要处理的位号
f: 共 7 位，表示通用寄存器的地址

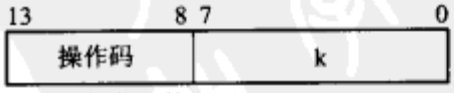
图 6.25 位处理指令的格式

立即数操作指令和控制指令

代码中含有常数和立即数（文字常数）以及在程序中指定跳跃目标的标记，是进行运算、程序的跳跃、PIC 控制的指令（见图 6.26）。



k:11 位的立即数



k:8 位的立即数

图 6.26 立即数操作指令和控制指令的格式

指令集

PIC 16F 的指令集如表 6.8 所示。

表 6.8 PIC16F 的指令集

类 型	命 令		说 明
字节处理指令	ADDWF	f,d	W 寄存器和 f 寄存器的加法
	ANDWF	f,d	W 寄存器和 f 寄存器的逻辑与
	CLRF	f	f 寄存器的清零
	CLRW		W 寄存器的清零
	COMF	f,d	f 寄存器的取补码
	DECF	f,d	f 寄存器减量(减 1)
	DECFSZ	f,d	f 寄存器减量,结果为零执行下面的指令
	INCF	f,d	f 寄存器增量(加 1)
	INCFSZ	f,d	f 寄存器增量,结果为零执行下面的指令
	IORWF	f,d	W 寄存器和 f 寄存器做或运算
	MOVF	f,d	移动 f 的内容
	MOVWF	f	将 W 的内容向 f 移动
	NOP		NoOperation(什么都不做)
	RLF	f,d	f 带进位标志循环左移
	RRF	f,d	f 带进位标志循环右移
	SUBWF	f,d	用 f 减去 W
	SWAPF	f,d	交换 f 的前 4 位和后 4 位
	XORWF	f,d	W 和 f 进行异或
位处理指令	BCF	f,b	将 f 中的第 b 位清零
	BSF	f,b	将 f 的第 b 位设置为 1
	BTFSC	f,b	如果 f 的第 b 位是零,执行下面的指令
	BTFSS	f,b	如果 f 的第 b 位是 1,执行下面的指令

续表 6.8

类 型	命 令	说 明
立即数操作指令和控制指令	ADDLW k	W 和立即数 k 加
	ANDLW k	W 和立即数 k 的逻辑与
	CALL k	调用 k 号子程序
	CLRWDT	WDT 定时器清零
	GOTO k	跳转到地址 k
	LORLW k	W 和立即数的逻辑或
	MOVLW k	将 W 赋予定值
	RETFIE	中断返回
	RETLW k	W 送常数，子程序返回
	RETURN	子程序返回
	SLEEP	转换到等待状态
	SUBLW k	从立即数减去 W 的值
	XORLW k	W 和立即数逻辑异或

注：d 用来指定操作结果存储的位置，d=0 表示存储到 W 寄存器，d=1 表示存储到 f 寄存器。

10　PIC 定时器

要　点

PIC 使用了标准的间隔时钟和计数器，其内部安装了 TMR0 组件，能够定时产生中断。芯片内还带有用来监视程序失控的看门狗定时器(watch dog)。

解　释

TMR0 组件

图 6.27 所示为 TMR0 组件的内部结构。

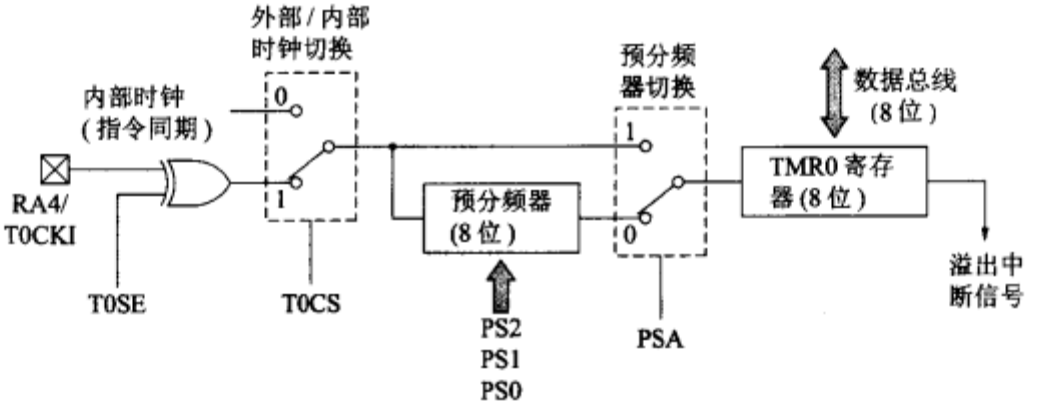


图 6.27　TMR0 组件的内部结构

驱动定时器的时钟，通过 T0CS 来选择是使用内部信号还是 RA4/T0CKI 管脚的外部信号。此外，无论是否选择时钟信号，TMR0 的预分频器要用 PSA 设定。定时器本身的 TMR0 寄存器，用于 8 位计数器 TMR0 溢出发生中断时，专用寄存器 INTCON 的 T0IF 位设定 1。

预分频器　TMR0 计数器是 8bit 的，计数最大为 0～255。为此在 TMR0 计数器的前段配置了 8bit 的预分频器，能进行 16bit 的计数。预分频器的分频数由 OPTION_REG 寄存器的 PS2～PS0 这 3 位的值确定，并可调整定时器的时间间隔。

OPTION_REG 寄存器　图 6.28 所示为专用寄存器 OPTION_REG 的 8 位，对它的设定将决定定时器的动作。表 6.9 所示为 OPTION_REG 寄存器的功能描述。

$\overline{\text{RBUP}}$	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0

图 6.28 OPTION_REG 寄存器

表 6.9 OPTION _ REG 寄存器的功能

位	功 能
$\overline{\text{RBUP}}$	0 为 PORTB 上拉,1 为取消 PORTB 的上拉
INTEDG	中断脉冲沿的选择。0 为下降沿,1 为上升沿
T0CS	TMR0 的时钟选择。0 为内部时钟,1 为外部时钟
T0SE	外部时钟脉冲沿的选择。0 为下降沿,1 为上升沿
PSA	预定标器的指定。0 为 TMR0 使用,1 为监视定时器使用
PS2～PS0	根据 3 位的值指定预定标器的分频比

看门狗计时器

微型计算机不论什么原因的失控,都会丢失输入/输出的应答,要重复同样的处理。在机械控制中,希望能够自动地避免微型计算机的这种失控,微型计算机利用看门狗计时器看门狗失控和复位。如果启动看门狗计时器,就会定时地对 PIC 进行强制复位,程序将从头开始运行。在程序中预先放置清除看门狗计时器的命令 CLRWDT,可以避免定时器强制复位。为使程序顺利运行,要定期性地执行这个回避动作。如果失控回避动作不工作,PIC 就强制复位。另外,PIC 的 TMR0 和看门狗计时器使用同一预定标器,这一点在编程序时需要注意。

11　PIC与外部设备的连接

要　点

PIC中集成了CPU、存储器、I/O端口、时钟电路等基本动作需要的组件，可以直接连接外部设备。在实际连接时，需要先了解PIC的电气特性，再进行外部设备的连接。

解　释

时钟电路

PIC动作的时钟信号，在PIC的OSC1、OSC2引脚连接水晶振荡器或陶瓷振荡器就可以实现内部的时钟电路（见图6.29）。同时，在只使用内部电路连接外部振荡器的时候，要在**配置寄存器**中设置若干个振荡方式。

配置寄存器

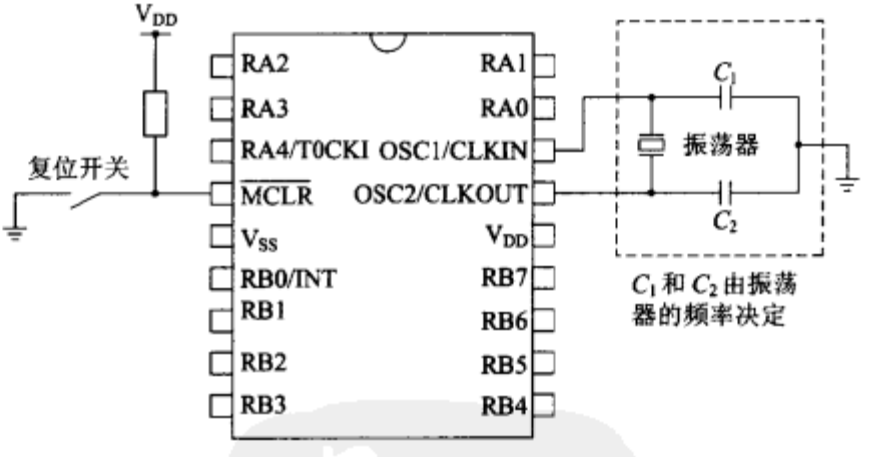


图6.29　PIC16F84A与振荡器和复位开关的连接

复位输入

PIC除了通过$\overline{\text{MCLR}}$引脚低电平复位外，为使电源投入后稳定工作，要具有投入一定时间后的复位Power-On-Reset（POR）、检查到电源降低的掉电锁定复位（BOR）等功能。但是，当电源电压极低、电源的供给不稳定等时，内部的POR和BOR就不能够对应，需要在$\overline{\text{MCLR}}$引脚连接外部复位电路。

开关输入

当PIC的端口A、端口B要进行信号的输入时，在专用寄存器TRISA、TRISB对应的位设定1。各端口的输入信

号，能从专用寄存器 OPRTA、PORTB 取出。PORTB 在专用 OPTION_REG 的第 7 位设定 0 的时候，回路内所有位被上拉。图 6.30 是 PIC 连接输入开关的例子。

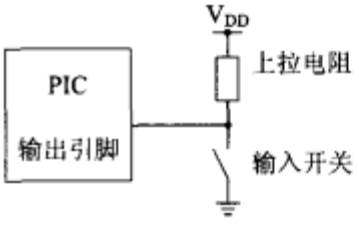


图 6.30 PIC 连接输入开关

LED 输出

当 PIC 的端口 A、端口 B 要进行信号的输出时，在专用寄存器 TRISA、TRISB 对应的位设定 0。给各端口的信号，由专用寄存器 PORTA、PORTB 写入的数据输出。在输出设定时，POTRB 的上拉功能自动关断。同时，为使每个引脚输出的最大电流不超过 25mA，需要有限制电流的电阻（见图 6.31）。通常，点亮 LED 需要 5～10mA 的电流。

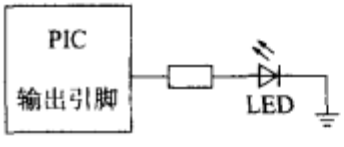


图 6.31 LED 的输出

题外话

颤 动

微型计算机连接的复位电路和输入使用的开关由于机械原因而产生不规则的电振动被称为颤动。在输入端口读取信号时，为了避免颤动的影响，可以附加消除颤动用的积分电路，也可使用在程序中通过定时器确定经过一定时间后的输入状态等方法。

12　PIC的使用例(比赛用机器人的制作)

要　点

本节将介绍利用PIC16F84A制作比赛用小型机器人的例子。PIC输出端口的信号通过电机驱动芯片驱动DC电机。检测障碍物的超声波传感器2个,检测比赛场地白线的红外线传感器2个,由输入端口读入信号。程序开发利用Microchip Technology公司的免费软件MPLABO IDE和PIC用C编译程序。

图6.32是比赛用机器人的外形。

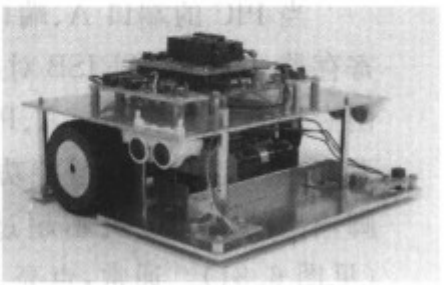


图6.32　比赛用机器人的外形

解　释

机器人的硬件构成

图6.33是比赛用机器人的模块构成框图,机器人是由在铝制机架上安装的微型计算机板、电源、电动机驱动基板和传感器基板构成。

图6.34至图6.37是机器人使用的各种电路,图6.38和图6.39是实际安装的状态。

软件开发环境

PIC的程序开发一般使用Microchip Technology公司提供的免费软件,被称为MPLABO IDE(Integrate Ddevelopment Environment)的综合开发环境(见图6.40)。此外,也可使用Microchip Technology公司以外的许多公司在销售使用C语言的产品版编译器,与MPLABO IDE整合起来,可以形成精密的软件开发环境。

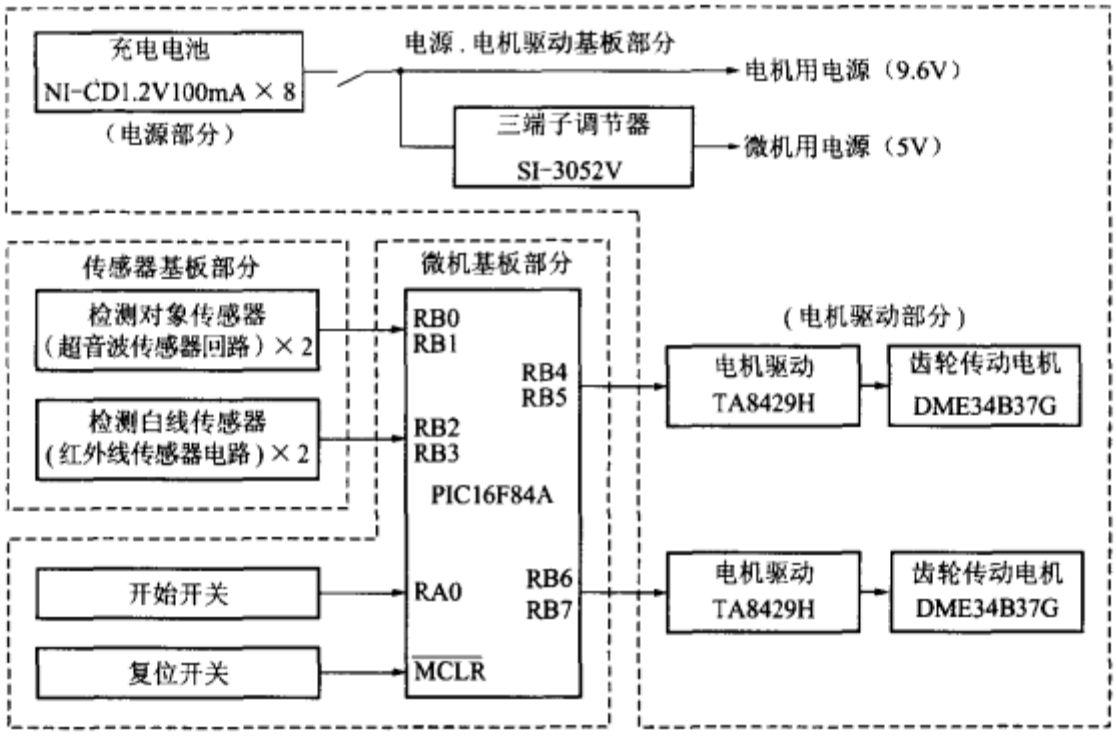


图 6.33　比赛用机器人的模块构成框图

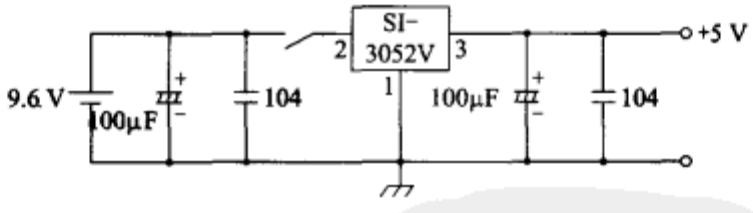


图 6.34　电源部分电路

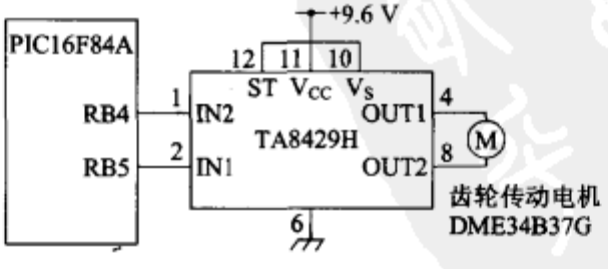


图 6.35　电机驱动电路

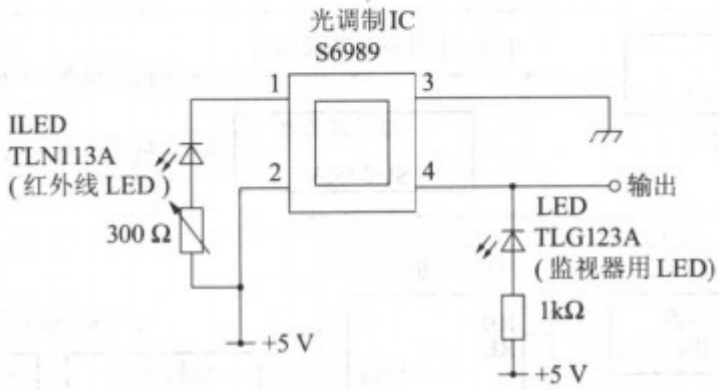


图 6.36　红外线传感器电路

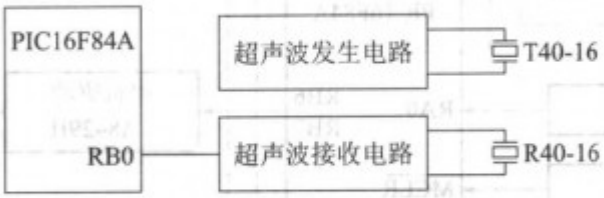


图 6.37　超声波传感器

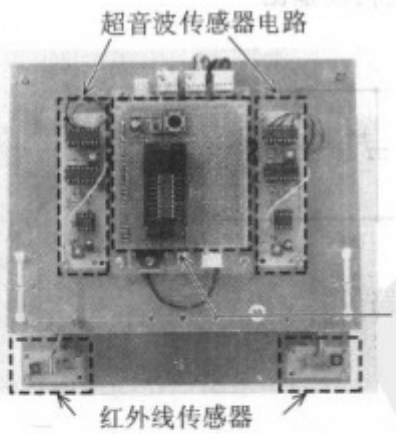


图 6.38　比赛用机器人的电路板

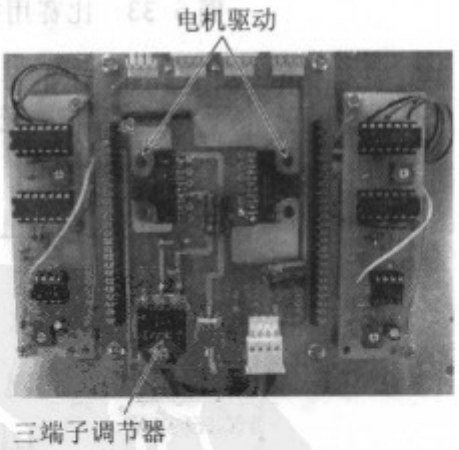


图 6.39　电源和电机驱动的电路板



图 6.40　MPLABO IDE 的综合开发环境

机器人的控制程序

以使用 Custom Computer Services 公司的 CCS PIC C 编译器的程序为例进行说明。

① 初始设定:编程使用的 PIC 型号的设定、PIC 基本动作的配置字的设置。

```
# includer < 16t84a.h>
# fuses HS, NOWDT,NOPROTECT,PUT
# use delay (clock= 10000000)
# use fast_io(a)
# use fast_io(b)
```

第一行:include PIC16F84A 用的头文件。

第二行:时钟使用 HS 模式(根据磁共振的原理高速运作)。

不使用监视定时器。

不采用存储器保护。

使用 power up。

第三行:时钟频率为 10MHz。

第四行:把 RA 端口设定为高速 I/O(使用输入/输出方向固定设置)。

第五行:把 RB 端口设定为高速 I/O(使用输入/输出方向固定设置)。

② 检查启动开关 开始开关与 RA0 连接。用 TRISA 寄存器设定 RA0 输入方式,通过位单位的输入使 RA0 电平输入 Low,并作无限循环。

```
set_tris_a(0x01)
while (input(PIN_a0))
```

③ 传感器输入检查:

第一行:在 TRISA 寄存器中设定 RA0 输入方式。

第二行:在 RA0 电平为 High 前(在没有按压按钮的时候)作无限循环。

④ 传感器输入:将与 RB0、RB1 连接的超声波传感器和

与 RB2、RB3 连接的红外线线传感器的状态读入，用 TRISB 设定 RA0～RB3 为输入方式，并读取各位状态，给变量赋值。

```
int ut_1,ut_2,lin_1,lin_2;
set_tris_b(0x0f);
if(input (PIN_b0))ut_1= TRUE;
if(input (PIN_b1))ut_2= TRUE;
if(input (PIN_b2))ut_3= TRUE;
if(input (PIN_b3))ut_4= TRUE;
```

第 1 行：整数型定义表示各传感器状态的变量。

ut_1,ut_2 超声波传感器状态的变量。

lin_1,lin_2 红外线传感器状态的变量。

第 2 行：TRISB 寄存器设置 RB0～RB3 为输入方式，设置 RB4～RB7 为输出方式(电动机控制信号用)。

第 3～6 行：读取 RB0～RB3 各位的状态，在高电平时，给对应变量设定 1(TRUE)。

⑤ 电动机控制：以 RB4、RB5 为一组和以 RB6、RB7 为一组控制两个电机驱动器。用 TRISB 寄存器设定 RB4～RB7 为输出方式，根据变量 lin_1 和 lin_2 的状态，用以位为单位的输出函数控制两个电动机的开和关。表 6.10 所示为电机驱动器信号和电机动作的关系。电机驱动器的 IN1 和 IN2 信号由 PIC 的输出信号来设定，由 IN1 和 IN2 信号控制电动机的运转。

表 6.10 电机驱动器信号和电机动作的关系

输 入		输 出		电机状态
IN1(RB5,RB7)	IN2(RB4,RB6)	OUT1	OUT2	
H	H	L	L	断路
L	H	L	H	逆转
H	L	H	L	正转
L	L	OFF		停止

下面的程序是根据红外线传感器的状态使电动机运转的例子。

```
    # include < 16f84a.h>
    # fuses HS, NOWDT,NOPROTECT,PUT
    # use delay (clock= 10000000)
    # use fast_io(a)
    # use fast_io(b)
    main()
    {
      int ut_1,ut_2,lin_1,lin_2;

    set_tris_a(0x01); / * 设置 A0 为输入* /
    set_tris_b(0x0f); / * 设置 B0~ B3 为输入，
B4~ B7 为输出* /
    /* 所有电动机停止* /

    output_bit(PIN_B5,0);
    output_bit(PIN_B4,0);
    output_bit(PIN_B7,0);
    output_bit(PIN_B6,0);

    while (input (PIN_A0));/* 等待开始开关输
入* /

    while(1){
    if (input (PIN_B2))lin_1= TRUE; /* 红外线传
感器 1 输入* /
    if (input (PIN_B3))lin_2= TRUE; /* 红外线传
感器 2 输入* /

    if (lin_1 = = FALSE){ /* lin_1 为 Low 时电动
机 1 停止* /
        output_bit(PIN_B5,0);
        output_bit(PIN_B4,0);
```

```
}
    else {/* lin_1 不为 Low 时电动机 1 正转* /
    output_bit(PIN_B5,1);
    output_bit(PIN_B4,0);}
    }
    if(lin_2 = =  FALSE){ /* lin_2 为 Low 时电动
机 2 停止* /
        output_bit(PIN_B7,0);
       output_bit(PIN_B6,0);
    }
    else {/* lin_2 不为 Low 时电动机 2 反转* /
      output_bit(PIN_B7,0);
      output_bit(PIN_B6,1);}
    }
    lin_1= lin_2= FALSE;
    }
}
```

13 嵌入软件

要 点

将在家电产品、控制机电、信息通信机器、便携式信息终端等中包含的微型计算机和将控制程序植入机器内的系统叫做嵌入式系统，程序等控制用的特定软件叫嵌入软件。

解 释

嵌入式系统

嵌入式系统的特征

嵌入式系统(embedded system)是以微型计算机作为控制系统的中心，通过预先制定的输入/输出信号，遵从特定逻辑进行处理的系统。最新的嵌入式系统，是用 RISC 芯片的微型计算机和内部软件，代替了以前由通用 IC 和专用 IC 结合的硬件设计的许多功能(见图 6.41)。以硬件为中心进行设计，重视软件的系统构造，通过削减硬件的零、部件数量来降低成本，构造柔性系统，开发工序柔软化，使制造成本降低。而且具有了更多柔性系统的特征，只需要变更软件就可以扩充功能。

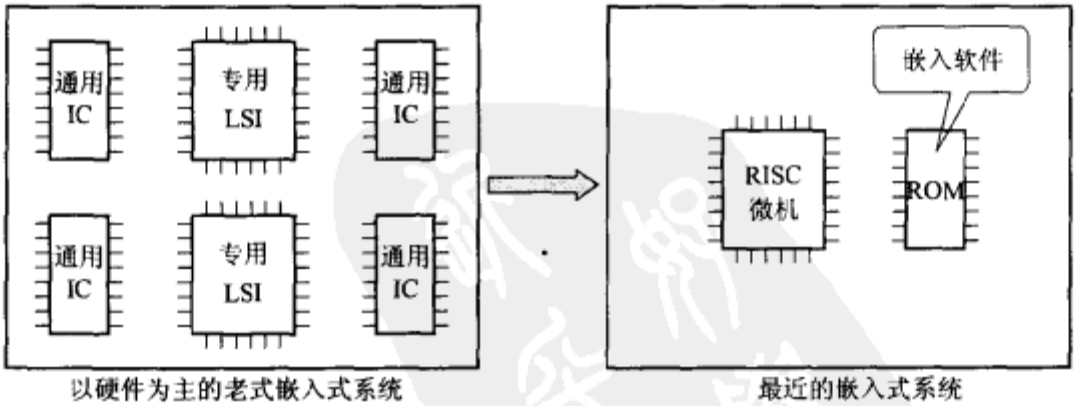


图 6.41 软件的嵌入式系统

嵌入软件

嵌入式系统中必须是实时系统才可以使用嵌入软件。

实时系统

实时系统是根据来自外部的信号，内部状态变化在极短的时间内做出反应的系统。使用高性能的 RISC 微型计算机和被称为**实时 OS**(Operating System)的**操作系统**就可以构建这种实时系统。

实时 OS 操作系统

实时操作系统

如果用计算机进行复杂的处理时，要用操作系统作为管理程序。Windows 和 UNIX 等个人计算机工作站的操作系统是 **GUI**(Graphical User Interface)等，用户可操作性非常好。操作系统的重要功能是计算机的**资源管理**、程序的**运行管理**。一般操作系统具有以下特点。

GUI

资源管理

运行管理

① 能够有效地利用存储器和外部存储装置。

② 操作系统对硬件的差异兼容。

③ 可简单地实现多任务处理。

即使是嵌入式系统，在执行多个程序和多任务的时候，也必须进行资源管理和程序运行管理。实时处理使用的特殊操作系统叫实时操作系统。可以利用实时操作系统开发出高效率的嵌入式系统的软件。表 6.11 是一般操作系统和实时操作系统的特征。

表 6.11　一般操作系统和实时操作系统的特征

	主要特征	管理的资源	实时性
个人计算机的OS	GUI 和文件管理系统较好	硬盘，内存，外部设备等	允许有些微的延迟
实时 OS	适合实时处理	存储器，I/O 设备等	任务间的定时管理严格，不允许产生延迟

相关知识

◆资　源

在计算机中，将 CPU 和内存、外部存储装置、连接的外部设备等叫资源(resource)。同时，计算机必须处理的程序、设备驱动和库等程序组叫做软件资源，它们都是操作系统管理的对象。

◆多任务管理

计算机能够运行和管理的最小单位叫任务(task)。任务可以得到硬件的资源和 CPU 分配的执行权等。在多个任务竞争的时候，高效率地进行多任务处理是操作系统的重要功能。

◆典型的实时操作系统

VxWORKS　它是 WIND RIVER 公司开发的实时操作系统，主要应用于

汽车、航空和航天等系统。两足步行机器人和 NASA 的火星探测器也采用了该系统。

ITRON 东京大学的坂村健博士提出嵌入式系统使用的实时操作系统 TRON(The Real-time Operating system Nucleus)的设计，并且是公开的开放结构(open architecture)，这使它在日本国内的 AV 机器、家电、汽车导航设备、通信机器、FA 机器等领域广为使用。

题外话

FPGA 和 HDL

早期的嵌入式系统开发中使用通用 MPU 和专用处理器等硬件在电路板上的组合设计。之后，特殊用途的 LSI，即 ASIC(Application Specific IC)的推出，使产品开发的硬件设计更加容易。ASIC 是为嵌入式系统的特定处理特别设计的专用 LSI，其体积小、速度快。一般的 ASIC 设计开发需要大量的半导体元件，只有在长期实际使用中得到验证后，才能够通过大批量生产来降低成本。

近几年，ASIC 开发的新潮流是使用现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Array)和 HDL(Hardware Description Language)语言开发少量多品种的 LSI。用 HDL 语言定义硬件要实现的功能，写入 FPGA 中，就可以试制专用 LSI 和进行少量生产了。HDL 除了可以使用生产商提供的商品以外，也可以选择使用 IEEE 标准化的商品等。通过引入新的方法，可以实现缩短产品开发周期、降低开发成本的开发环境。

14 实时处理

要 点

嵌入式系统对时间要求很严格，要求在一定的时间内输出任务的处理结果。个人计算机与人之间的操作的实时任务系统叫软实时系统。与之对应的是嵌入式系统对机器间的通信必须有严格的时间管理，叫硬实时系统。

解 释

事 件

事件

嵌入式系统必须依次处理来自外部的传感器信息，以及经由网络其他机器任务处理要求。这些处理要求叫**事件**，要求在一定的时间内得到系统的响应。同时必须将发生的事件按优先顺序在一定的时间内进行响应（见图 6.42）。

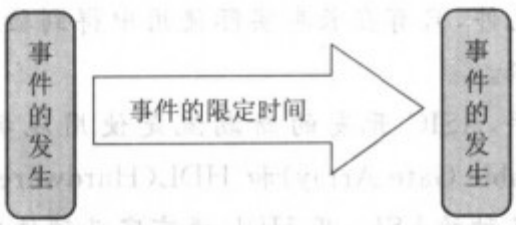


图 6.42 嵌入式系统的实时性

实时操作系统的任务是对多个事件按优先顺序进行调度。但是，有时会有受到处理的内容及硬件的影响而在限定的时间内处理不完的情况发生，是实时操作系统不能够保证的。这一点在嵌入式系统设计开发时需要注意。

实时处理的例子

汽车导航系统 如图 6.43 所示的汽车导航系统，通过接收卫星传来的电波来确定现在的位置，并将机器内的地图数据和汽车现在的位置显示在画面上。同时根据车速信息，不断地显示当前准确的位置。并且用声音和画面显示到达目的地的最合适的路线等，防止驾驶员走错路。在这里，汽车导航系统是需要将每时每刻变化的情况在一定时间内处理完的实时系统。

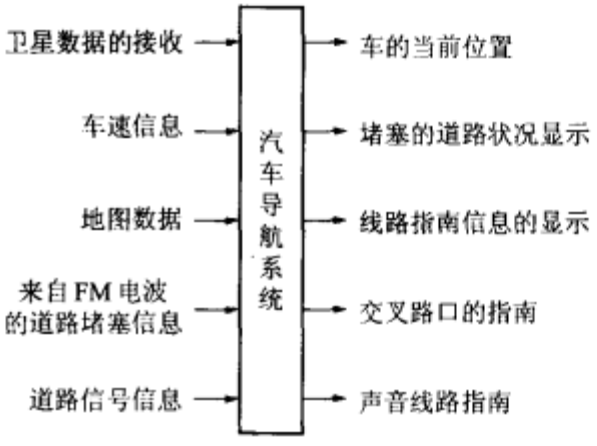


图 6.43 汽车导航系统

两足步行机器人 大企业正在进行和真人一样大小的两足步行机器人的开发，其性能逐年提高。与人类相同，机器人需要对路面状况和机器人姿态的实时测量计算，确定机器人的行走路线和姿势控制都高度依赖实时系统。特别是为了保持行走的平衡，下一步的落地点、多个驱动器的指令数据发送时序都很重要，处理时间的延迟可能导致机器人摔倒。因此，不仅需要提高实时系统的处理速度，还要引入机器人运动的预测软件。

通常，系统要协调处理多个同步的问题。当在一定的时间内一个处理没有完成，将会导致整个系统的性能下降，甚至有使系统停止的可能，将这种系统叫做**临界任务系统**。对于高性能的机器人控制航空器的系统，以及对影像信息等大量数据解码的 AV 装置，处理延迟造成的损害是很大的，它是一个临界任务系统。

临界任务系统

15 中断机制

要点

操作系统能够顺利地转换任务是嵌入式系统实时处理多重任务时必需的。这时，输入/输出装置和CPU定时器发生中断，以及中断后的中断处理，对切换任务有着重要的作用。

解释

中断的种类

中断

中断(interrupt)是计算机对CPU中断正在进行的任务，进入新任务的功能，被中断的任务在其他的时间接着处理(见图6.44)。输入/输出装置等，通过CPU的中断引脚输入的中断称为**外部中断**。运算结果的溢出、0做除数的除法等由于CPU内部原因发生的，以及其他任务通过软件方法产生的中断称为**内部中断**。任务切换用的间隔中断插入称为**时间中断**。

外部中断

内部中断

时间中断

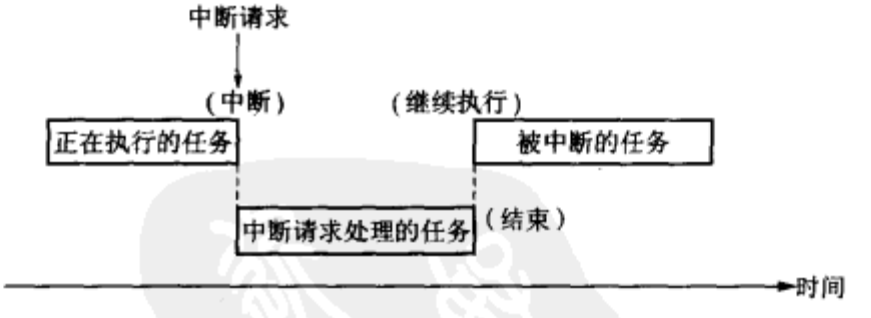


图6.44 中断处理示意

任务信息的保护

由中断挂起的任务，为了在中断处理结束后能够重新进入任务，需要将中断前的状态、任务的优先次序、任务号码、寄存器的内容、执行地址等放在堆栈保护。操作系统为各任务生成**任务控制块**(TCB: Task Control Block)来进行任务管理。和任务相关的状态信息称为**上下文**(context)。

任务控制块

上下文

多重中断

在实时处理中，中断请求很频繁，在中断处理过程中其他的任务可能进行中断请求。只单纯按中断请求发生顺序

进行处理是不行的，在处理中断时必须判断中断优先权。考虑了优先权后就可以进行多重中断的处理了（见图 6.45）。

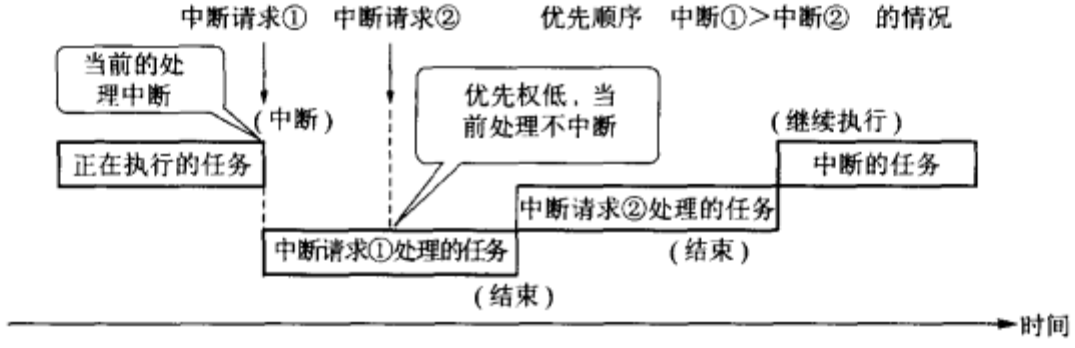


图 6.45　多重中断的执行

由时间间隔定时器中断来切换任务

时间共享方式

时间片

轮询方式

如图 6.46 所示，由时间间隔定时器中断来切换任务的方式称为**时间共享方式**（timesharing），时间间隔叫**时间片**。在时间共享方式下，时间片平等地分配给各任务，以便多任务能同一时间执行。另外，对同一优先顺序的任务，顺序地分配时间片的**轮询方式**使用得也比较多，要不断地询问任务是否用完时间片，任务是否改变优先顺序。通常，对于不定期发生中断的实时系统，不使用时间共享方式。

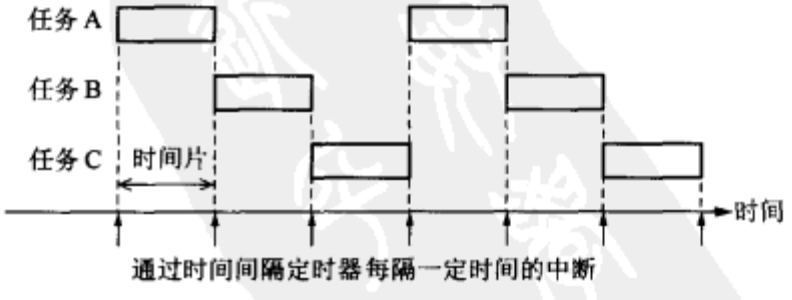


图 6.46　时间共享方式

16　任务管理

要　点

对于嵌入式系统，实时操作系统的重要功能是对多任务执行的先后顺序的管理。按照优先顺序管理的方式叫优先权方式；根据事件的发生切换任务的是事件驱动方式。对于多任务实时处理的主要方式是以上两种方式并用的任务调度方式。

解　释

采用事件驱动优先权方式的多路程序设计

事件驱动优先权方式如图 6.47 所示，中断优先权高的任务提出中断请求时，正在执行的任务被中断。任务由操作系统的**上下文开关**切换。另外，将提供多路程序设计的操作系统的功能叫做**任务调度功能**，是在被称为操作系统**内核**(kernel)的模块中实现。

上下文开关
任务调度功能
内核

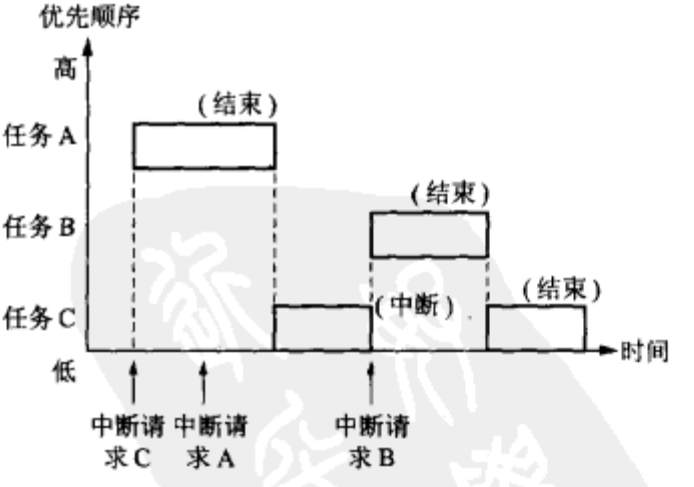


图 6.47　事件驱动优先权方式

内核的主要功能是：任务的调度(scheduling)功能；多重中断控制功能；系统调用功能。其中系统调用功能是与任务的生成和结束、任务同步相关的功能，能够从程序中调用。

任务的状态

一般在内核里，对于各个任务管理而设置任务控制块(TCB)。任务在某一时刻的状态有就绪状态、执行状态、等待状态。通过内核任务调度的功能能够进行状态切换(见

图 6.48)。内核对执行权的分配叫调遣(dispatch)。

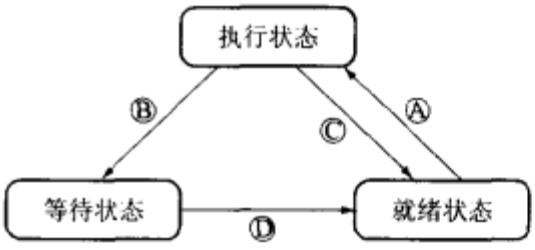


图 6.48 任务的状态

就绪状态 这是马上能够执行任务的状态。根据优先权从内核得到执行权时变为执行状态(见图 6.48 的Ⓐ)

执行状态 这是执行任务的状态。在执行当中,如果有等待其他任务处理发生时,则成为等待状态(见图 6.48 的Ⓑ)。在执行优先权更高的任务时,转为就绪状态。(见图 6.48 的Ⓒ)

等待状态 等待其他任务的处理结果和执行时所用资源的分配。执行所必需的条件完备后变为就绪状态(见图 6.48的Ⓓ)。

相关知识

◆ 资源的管理

微型计算机可以利用的资源是任务间所共有的,操作系统具有共有资源使用权在任务间排他性地分配的功能。这样的功能,能回避多个任务在同一变量区域写入不同的结果。当多个任务在拥有的资源没有释放时就进入到等待状态中,导致双方的任务进入到静止不动的状态中,这就叫做死锁(见图 6.49)。为了避免死锁,需规定资源拥有的顺序,任务一旦拥有资源后,在进

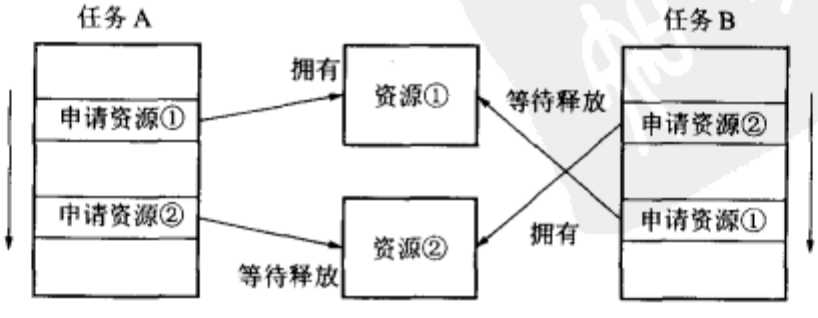


图 6.49 死 锁

入等待其他开放状态的资源时，就要释放已经拥有的资源。

◆ **内核的系统调用功能**

在操作系统的内核里有完备的从程序进行任务控制和中断处理执行的系统调用功能。这就是在程序中调用外部函数(API: Application Programming Interface)，外部函数的主要功能如下。

任务控制　具有任务的生成、启动、结束，以及使其他任务结束、任务优先权顺序的变更等功能。从程序中调用后，操作系统便按优先顺序进行处理。

信号量操作　信号量操作也有“信号机”的意思，利用变量实现多任务间同时使用资源的排他控制。一般信号量操作有P操作和V操作。

P操作：在信号量S不为0时，S减1的操作继续进行。如果S为0，那么在S变为正之前都会保持等待状态。

V操作：如果有等待信号量S的任务，则为等待状态。如果没有等待信号量S的任务，则S进行加1操作。

通常，在资源的排他控制中，P操作相当于保持资源，V操作相当于释放资源。

同步标志的操作　同步标志是内核所提供的具有代表性的任务间同步的方法。同步标志是具有Set/Reset两种状态的变量。一个任务必须得到另一个任务的同步标志才能运行，否则处于等待状态。

第 7 章

机械电子系统控制

● 责任编委
渡边嘉二郎
● 执　笔
岩月正见

在支持机电一体化的重要控制技术中，主要有反馈控制和顺序控制。

在本章中将学习反馈控制的数学基础，即拉普拉斯变换和传递函数、方框图及控制系统的特性等内容，并以机电一体化中常用的直流伺服系统和液压伺服系统等反馈控制系统为例加以说明。

本章将从顺序控制单元电路及逻辑电路的基本理论出发，学习顺序控制在电动机控制和机器人控制中的应用方法。

本章内容包括了具有一定难度的数学知识，需要通过反复阅读来掌握这些内容，这一点是十分重要的。

1　什么是系统模型

要　点

所谓系统模型，就是“以能够适应系统控制目标的输入量和输出量为参数，对以物理实体形式存在的控制对象作出数学形式的描述”。这种数学形式的描述通常以微分方程的形式来表达。

解　释

建立控制对象模型的意义

当对某物理实体的控制有较高精度要求时，如果输出量偏离了目标值，一般情况下要立即相应地调节输入量，以消除偏差。为此，首先应该对控制目标在数量上有一个明确的把握，也就是说，必须首先对控制对象进行**数学建模**。从物理实体的数学描述出发，就可以应用工程上的设计方法进行控制系统的设计。

数学建模

系统模型的方框图

系统模型

要简化**系统模型**，可以采用如图7.1所示的包括输入和输出的系统方框图。以控制电动机的转速为例，如果取电动机的输入为**外加电源电压**，则输出为**角速度**。在进行**位置控制**时，可以选择**电机的旋转角度**作为输出。因此，由于控制目的不同，对应的输入、输出量就会有所不同，即使是同一个控制对象，最终的数学模型也将不同。

外加电源电压
角速度
位置控制
电机的旋转角度

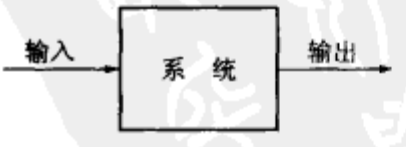


图7.1　系统的方框图

多输入/多输出系统

机器人控制器

机器人控制器是典型的机电一体化系统，在进行机器人手臂的位置和姿势控制时，为了使各关节的传动机构动作，需要输入多个转矩，并且输出应是用六维变量描述的手臂**位置和姿势**。因此，一般情况下，系统的输入量和输出量均大于1，称这种系统为**多输入/多输出系统**。在图7.1所

位置　姿势
多输入/多输出

系统

单输入/单输出系统

示的例子中，电动机只有一个输入量和一个输出量，这样的系统称为**单输入/单输出系统**。

简单的建模举例

推导出如图 7.2 所示的保温壶的数学模型的过程如下。通过控制加热器开关的通、断，使保温壶内的温度保持一定，这样就可以达到保温的目的。选择加热器产生的热量$Q(t)$(W)作为输入，以保温壶内的温度 $T(t)$(℃)作为输出。由于从保温壶向外部空气散发出去的热量 $\Delta Q(t)$与壶内温度 $T(t)$和外部气温 $O(t)$之差成正比例，即

$$\Delta Q(t)=K[O(t)-T(t)]$$

因此，水中积蓄的全部热量为由加热器注入的热量与外部空气散发热量之差，即

$$Q(t)-\Delta Q(t)=Q(t)-K[O(t)-T(t)]$$

而水中积蓄的热量与壶内温度的变化率成正例。经过以上讨论，保温壶的数学模型可用 1 阶微分方程式表示为

$$C\frac{\mathrm{d}T(t)}{\mathrm{d}t}=Q(t)-K[O(t)-T(t)]$$

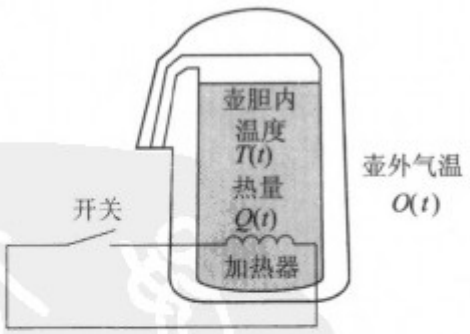


图 7.2 保温壶的数学模型

相关知识

◆ 系统标定

在得到控制对象的数学模型后，必须确定微分方程式中所包含的系数(参数)，否则无法对系统进行分析。这样的未知参数可以根据产品的样品取得，但在大多数情况下必须由控制系统的设计者求出。即使根据产品的样品得到了系统参数，但由于制品品质的分散性，所得到的参数也往往是不正确的。因

此，在很多场合，控制系统设计者必须以不同产品为控制对象，对各种输入量反复进行响应实验，根据实验所得的数据来最后确定未知参数。用实验的方法来确定参数时，为了使其与真值的误差尽可能小，应选择合适的输入量及数据的处理方法。上述确定未知参数的过程称为系统标定。

2 拉普拉斯变换

要 点

所谓拉普拉斯变换就是把在时域内所描述的微分方程式(以时间 t 作为自变量)变换为复频域内的代数方程式(以复频率 s 作为自变量),从而使求解过程简化的一种数学方法。

解 释

拉普拉斯变换的意义

微分方程式

如果已经得到了控制对象的数学模型,通过对该**微分方程式**的求解,可以了解系统对各种输入的响应。进行系统分析时,采用拉普拉斯变换比较方便。采用拉普拉斯变换方法求解微分方程式时,不受初始值、输入函数及微分方程阶数等限制,通常可以按照一定步骤以统一的形式求解。通过拉普拉斯变换能够把含有微分和积分的方程式变换成关于**拉普拉斯算子** s 的**代数方程式**,因此不必进行微分和积分运算,只需进行加、减、乘、除运算就可以很容易地求得方程式的解,这是拉普拉斯变换的主要优点。另外,对于工程问题的求解,可以从重要的频域观点出发来进行系统分析,这是其又一个优点。

拉普拉斯算子

代数方程式

拉普拉斯变换的定义

对于给定的函数 $f(t)$,其拉普拉斯变换 $F(s)$ 由下式定义:

$$F(s)=\int_0^\infty f(t)\mathrm{e}^{-st}\,\mathrm{d}t \tag{7.1}$$

拉普拉斯变换表

各种函数的拉普拉斯变换已经汇总成**拉普拉斯变换表**,实际应用时,不必对式(7.1)所示的积分求解。反之,从拉普拉斯变换 $F(s)$ 求取对应的时间函数 $f(t)$ 时,可将 $F(s)$ 作部分分式展开,再经适当变形后查取拉普拉斯变换表,就可以求得对应的时间函数。这种反变换称为**拉普拉斯逆变换**。

拉普拉斯逆变换

拉普拉斯变换

一些主要函数的**拉普拉斯变换**对如表 7.1 所示。

表 7.1　拉普拉斯变换表

$f(t)$	$F(s)$
$\delta(t)$	1
1	$\frac{1}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
$t^n e^{-at}$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
$\sin\omega t$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
$\cos\omega t$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
$\sin(\omega t+\phi)$	$\frac{s\sin\phi+\omega\cos\phi}{s^2+\omega^2}$
$\cos(\omega t+\phi)$	$\frac{s\cos\phi-\omega\sin\phi}{s^2+\omega^2}$
$e^{-at}\sin\omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$
$e^{-at}\cos\omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$
$\frac{df(t)}{dt}$	$sF(s)-f(0)$
$\frac{d^2f(t)}{dt^2}$	$sF(s)-sf(0)-f'(0)$
$\frac{d^nf(t)}{dt^n}$	$s^nF(s)-s^{n-1}f(0)-s^{n-2}f'(0)-\cdots$ $-sf^{(n-2)}(0)-f^{(n-1)}(0)$
$\int_0^t f(t)dt$	$\frac{1}{s}F(s)$

注：当 $t<0$ 时，表中的时间函数为 0，即函数随时间的变化从 $t\geqslant 0$ 开始。

采用拉普拉斯变换方法解微分方程式的简单例子

设系统的数学模型为以下的一阶微分方程式：

$$\frac{dy(t)}{dt}+ay(t)=u(t) \tag{7.2}$$

其中，输入函数 $u(t)$ 为：

$$u(t)=1 \quad (t\geqslant 0) \tag{7.3}$$

由表 7.1 所示的拉普拉斯变换表可以查得式(7.2)的拉普拉斯变换为

$$sY(s)-y(0)+aY(s)=U(s)=\frac{1}{s} \tag{7.4}$$

由式(7.4)求解输出函数 $Y(s)$，并对式中的第二项作部分分式展开，可得

$$\begin{aligned} Y(s)&=\frac{y(0)}{s+a}+\frac{1}{s(s+a)} \\ &=\frac{y(0)}{s+a}+\frac{1}{a}\left(\frac{1}{s}-\frac{1}{s+a}\right) \end{aligned} \tag{7.5}$$

由表 7.1 所示的拉普拉斯变换表，选择与式(7.5)中各项对应的时间函数，可得

$$\begin{aligned} y(t)&=y(0)\mathrm{e}^{-at}+\frac{1}{a}(1-\mathrm{e}^{-at}) \\ &=\frac{1}{a}+\left[y(0)-\frac{1}{a}\right]\mathrm{e}^{-at} \end{aligned} \tag{7.6}$$

如果初始值 $y(0)$ 已知，就可以得到系统输出函数 $y(t)$。

相关知识

◆ 线　性

所谓线性就是对应输入 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$，系统的输出分别为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$，选择任意常数 a、b，当以 $au_1(t)+bu_2(t)$ 作为输入时，得到的系统输出为 $ay_1(t)+by_2(t)$。系统的这种性质称为线性，也称为叠加原理。

◆ 时不变性

微分方程的系数所具有的不随时间的改变而变化的性质(稳态特性)称为时不变性，定常线性微分方程即常系数线性微分方程。如果所加的输入相同，则时不变性保证了可以得到与时刻无关的相同的系统响应。

◆ 因果性

从物理意义上来说，输入施加前其响应就已开始的系统是不存在的，系统的这种性质称为因果性。能够通过拉普拉斯变换解析的系统，必须全部满足上述的线性、时不变性及因果性。

◆ 非线性

不满足线性关系的系统称为非线性系统。严格地说，世界上的所有系统

都是非线性的，然而在实用范围内，有很多场合可以当作理想线性系统处理。从系统的结构上和原理上来说，非线性系统是大量存在的。例如，具有旋转型关节的机械手的姿势，即关节角和角速度等，它们之间的关系是用三角函数联系起来的，本质上是一个非线性系统。

3 传递函数及其响应

要 点

系统输出函数 $y(t)$ 的拉普拉斯变换 $Y(s)$ 与输入函数 $u(t)$ 的拉普拉斯变换 $U(s)$ 之比称为系统的传递函数。传递函数可以简洁、完整地表达系统输入函数与输出函数之间的关系。

解 释

传递函数的意义

稳态线性系统的响应可以采用解析法分析，通过求解相应的微分方程式求得输出函数，若输入函数或初始条件不同，系统响应也将不同。然而系统的输入/输出特性却与系统的输入及初始值无关，是系统所固有的特性。系统的这种与输入形式无关的本质属性应该通过某种形式表现出来，而传递函数就是一种常用的表述形式。

传递函数的定义

一般说来，对于用 n 阶微分方程式表示的系统，在零初始条件下，采用拉普拉斯变换，将输入/输出函数 $u(t)$ 和 $y(t)$ 变换成 $U(s)$ 和 $Y(s)$，则 n 阶微分方程式可变换为

$$\begin{aligned} &s^nY(s)+a_1s^{n-1}Y(s)+\cdots+a_nY(s)\\ &=b_0s^mU(s)+b_1s^{m-1}U(s)+\cdots+b_mU(s) \end{aligned} \tag{7.7}$$

输出函数的拉普拉斯变换 $Y(s)$ 与输入函数的拉普拉斯变换 $U(s)$ 之比 $G(s)$ 为：

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{b_0s^m+b_1s^{m-1}+\cdots+b_{m-1}s+b_m}{s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_{n-1}s+a_n} \tag{7.8}$$

$G(s)$ 就称为系统的传递函数。由式(7.8)可知，传递函数与系统输入形式及初始值无关，而完全取决于系统自身的结构与参数，反映了系统的固有特性。因此，传递函数为 $G(s)$ 的系统可以用图 7.3 所示的系统方框图表示。

一阶延迟系统

对于第 7.2 节所例举的用一阶微分方程所描述的系统，

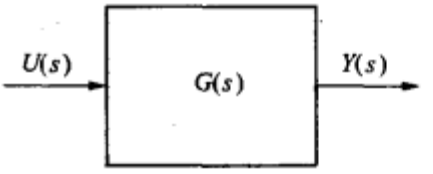


图 7.3　系统的方框图

若在零初始条件下 $y(0)=0$，其方程式可改写成

$$sY(s)+aY(s)=U(s) \tag{7.9}$$

该系统的传递函数为

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{1}{s+a} \tag{7.10}$$

一阶延迟系统

式(7.10)所示的系统称为**一阶延迟系统**。当 $a>0$ 时，一阶延迟系统对应单位阶跃输入的响应如图 7.4 所示。

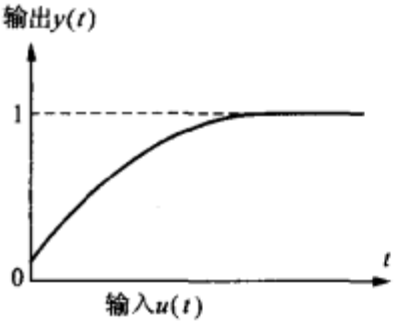


图 7.4　一阶延迟系统的响应

二阶延迟系统

系统的微分方程式为

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2}+a_1\frac{dy(t)}{dt}+a_2y(t)=u(t) \tag{7.11}$$

在零初始条件下，$y(0)=y'(0)=0$，取式(7.11)的拉普拉斯变换，得

$$s^2Y(s)+a_1sY(s)+a_2Y(s)=U(s) \tag{7.12}$$

则系统的传递函数为

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{1}{s^2+a_1s+a_2} \tag{7.13}$$

二阶延迟系统

分母多项式

式(7.13)所示的系统称为**二阶延迟系统**。一般情况下，式(7.13)的**分母多项式**的根为复数，当这个复数的实部为负数时，对应单位阶跃输入的系统响应如图 7.5 所示。

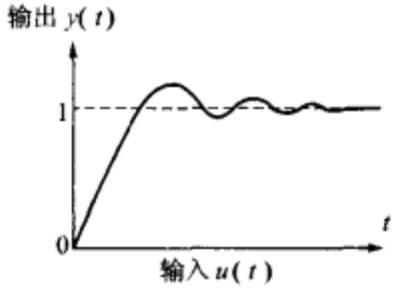


图 7.5 二阶延迟系统的响应

相关知识

◆ 极点与零点

传递函数的分母多项式与分子多项式的根分别称为极点和零点，极点和零点对于系统分析十分重要。设极点为 $p_i(i=1,2,\cdots,n)$、零点为 $z_i(i=1,2,\cdots,m)$，将分母和分子的多项式因式进行分解，则传递函数可表示为

$$G(s)=\frac{b_0(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)} \tag{7.14}$$

传递函数的极点与系统的稳定性条件有密切关系，这一问题将在第 7.6 节讲述。令传递函数的分母多项式等于零，即

$$s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_{n-1}s+a_n=0 \tag{7.15}$$

式(7.15)称为系统的特征方程，特征方程的根称为特征根。显然特征根与极点是一致的。

◆ 频率传递函数

传递函数 $G(s)$ 中的自变量——复频率 s，实际上是不存在的。然而，当取这个复频率为一个纯虚数，即取 $s=j\omega$ 并代入传递函数时，可得到对应的 $G(j\omega)$，其中的 ω 是作为实际量的角频率存在的，称函数 $G(j\omega)$ 为频率传递函数。一般说来，频率传递函数 $G(j\omega)$ 是一个复数函数，可以表示为

$$\begin{aligned}G(j\omega)&=R(\omega)+jX(\omega)\\&=|G(j\omega)|e^{j\phi(\omega)}=|G(j\omega)|\angle\phi(\omega)\end{aligned} \tag{7.16}$$

其中

$$|G(j\omega)|=\sqrt{R^2(\omega)+X^2(\omega)} \tag{7.17}$$

$$\phi(\omega)=\arctan\frac{x(\omega)}{R(\omega)} \tag{7.18}$$

绝对值 $G(j\omega)$ 表示当输入信号为正弦波，其角频率为 ω 时，输出信号与输

入信号的振幅之比(系统增益),相位角 $\phi(\omega)$表示输入信号与输出信号之间的相位差。也就是说,频率传递函数 $G(j\omega)$表征了系统的频率响应。

以角频率 ω(rad)为横轴,以增益 $20\lg|G(j\omega)|$(dB)和相位 $\phi(\omega)$(°)为纵轴绘制的曲线称为伯德图。

根据增益和相位绘制的曲线在视觉上清晰易懂,这种曲线图有奈奎斯特图(矢量轨迹)和幅-相特性图等。利用这些曲线图,可以进行基于频率特性的控制系统设计。

4 方框图

要 点

将系统或其中各部分用传递函数描述的单元方框来表示，按信号的流向用箭头连接而成的图形称为方框图。方框图可以把系统的构成和信号的流向直观而简洁地表现出来。

解 释

反馈控制

被控对象
控制器
反馈环节
设定值
偏差
控制量
被控量

一般说来，反馈控制的方框图可用图 7.6 表示。图中，$G(s)$、$C(s)$、$H(s)$分别为**被控对象**、**控制器**和**反馈环节**的传递函数。与图中的 $R(s)$、$E(s)$、$U(s)$、$Y(s)$对应的 $r(t)$、$e(t)$、$u(t)$和 $y(t)$分别称为**设定值**、**偏差**、**控制量**和**被控量**。应该特别指出，偏差 $e(t)$可以表示成：

$$e(t)=r(t)-y(t)$$

控制环节以目标值与实际被控量之差作为输入，并产生与这一差值相对应的控制量，从而对被控对象实施控制。

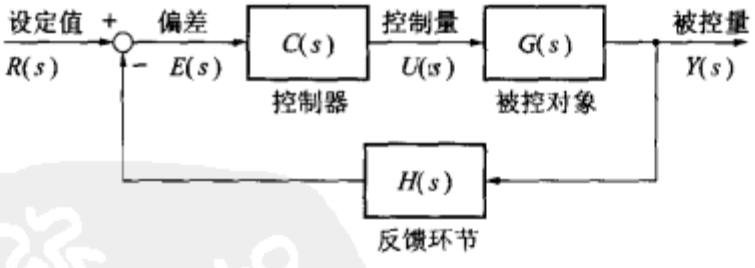


图 7.6 反馈控制的方框图

方框图的意义

一个控制系统可以按照功能的不同分解成若干环节。每个环节分别用一个方框表示，各环节的输入、输出信号的流向用箭头表示，并把各环节的方框连接起来。即使是一个复杂系统，也可以利用方框图描述成简洁而容易理解的形式。一般说来，每个方框图中应写入与输入和初始值无关的传递函数。另外，系统方框图中，各方框的传递函数应能按一定的规则进行合并，所传递的信号也不是时间的函数，而是经拉普拉斯变换后的复频率 s 的函数。

方框图中的基本符号

单元方框　求和点　分路点

由图 7.6 可知，方框图中的基本符号主要有**单元方框**、**求和点**和**分路点**等三种，如图 7.7 所示。

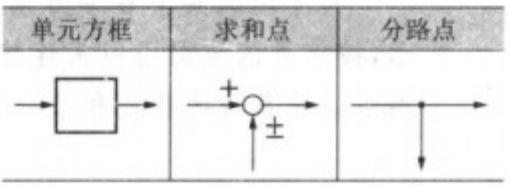


图 7.7　方框图的基本符号

方框图的简化

在图 7.6 中，每一部分都用一个方框来表示。然而实际上每一部分都可以进一步地分解成由多个环节构成的复杂系统。对于一个可以分解成很多环节并且信号流向复杂的系统来说，其方框图应尽可能用简单的形式来表示，这样可以简化系统的分析和设计。为此，可以利用图 7.8 所示的等效变换方法对系统方框图进行简化。在图 7.8 中，**方框串联**和**方框并联**的等效变换比较简单，对于**反馈的等效变换**可证明如下。设变换前 $G_1(s)$ 的输入为 $E(s)$，则

方框串联　方框并联　反馈的等效变换

$$Y(s)=G_1(s)E(s)$$

$$E(s)=U(s)\pm G_2(s)Y(s)$$

以上二式联立，消去 $E(s)$，并解出 $Y(s)$，得

$$Y(s)=\frac{G_1(s)}{1\mp G_1(s)G_2(s)}$$

可以看出，这一结果与图 7.8 中变换后的传递函数是一致的。

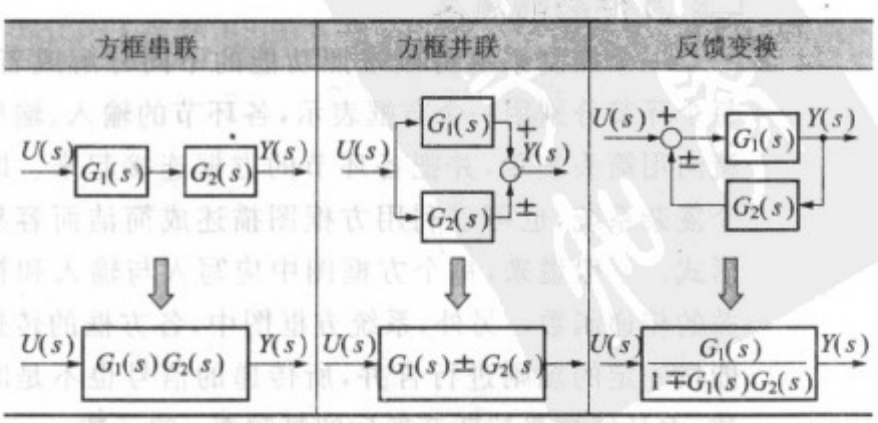


图 7.8　方框图的简化

5 稳态误差

要 点

加速度传感器是一种通过将其与被测对象接触或者将传感器安装在被测对象上来测量物体加速度的传感器。它广泛应用于振动或动态力的测量及控制等领域。

解 释

稳态误差的意义

在反馈控制系统中，当设定值发生变化或受到外部干扰时，被控量也会随之发生变化。理想情况下，从上述原因引起的被控量变化开始，经过一定时间后，被控量与设定值将趋于一致。然而一般情况下，控制系统无论采用何种设计方法，经过充分长的时间后，目标值与被控量之间都将残留一定的偏差，这种偏差称为**稳态误差**。把稳态误差抑制到何种程度是系统设计的重要指标之一。

稳态误差

稳态误差的定义

所谓稳态误差是指经过充分长的时间后，设定值与被控量之差。在时域中可以用下式表示：

$$\varepsilon=\lim_{t\to\infty}e(t)=\lim_{t\to\infty}[r(t)-y(t)] \tag{7.19}$$

终值定理

很多情况下，不仅需要在频域下分析系统的特性，有时也希望在频域内描述稳态误差。因此，可以使用如下所述的终值定理。

若时间函数 $f(t)$ 的拉普拉斯变换为 $F(s)$，则下式成立：

$$\lim_{t\to\infty}f(t)=\lim_{s\to0}sF(s) \tag{7.20}$$

根据终值定理，式(7.19)在频域内可以写为

$$\varepsilon=\lim_{s\to0}sE(s)=\lim_{s\to0}s[R(s)-Y(s)] \tag{7.21}$$

稳态误差举例

例如，求图 7.9 所示的一阶延迟反馈控制系统的稳态误差。应用第 7.4 节中图 7.8 所示的串联和反馈环节的**方框图简化**方法，可以把图 7.9 简化成图 7.10。如图 7.10 所示，从设定值 $R(s)$ 到被控量 $Y(s)$ 的传递函数可以表示成

方框图简化

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{\dfrac{K}{s+1}}{1+\dfrac{K}{s+1}}=\frac{K}{s+1+K} \tag{7.22}$$

因此，偏差 $E(s)$ 为：

$$\begin{aligned}E(s)&=R(s)-Y(s)\\&=\left(1-\frac{K}{s+1+K}\right)R(s)\\&=\frac{s+1}{s+1+K}R(s)\end{aligned} \tag{7.23}$$

如果以单位阶跃函数作为系统的设定值 $R(s)$ 输入，则根据终值定理，系统的稳态误差为

$$\begin{aligned}\varepsilon&=\lim_{s\to 0}sE(s)=\lim_{s\to 0}s\cdot\frac{s+1}{s+1+K}\cdot\frac{1}{s}\\&=\lim_{s\to 0}\frac{s+1}{s+1+K}=\frac{1}{1+K}\end{aligned} \tag{7.24}$$

由式(7.24)可知，由于 $K>0$，所以即使经过充分长的时间，图 7.9 所示的反馈控制系统的目标值与被控量也并不一致，即系统总存在稳态误差 $1/(1+K)$。

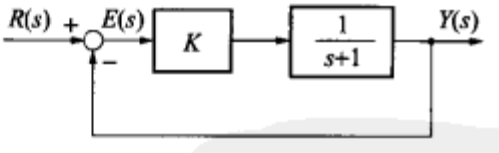


图 7.9　反馈控制系统

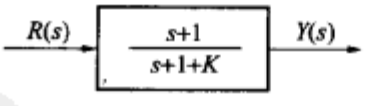


图 7.10　图 7.9 的简化

提高反馈系统增益可改善稳态误差

如图 7.9 所示，反馈控制系统的稳态误差为 $1/(1+K)$，因此增大增益 K 就可以减小系统的稳态误差。

积分环节 $1/s$

以输入 $u(t)$ 的积分作为输出 $y(t)$ 的系统可以表示成

$$y(t)=\int_0^t u(t)\mathrm{d}t \tag{7.25}$$

应用第 7.2 节介绍的方法，将式(7.25)进行拉普拉斯变换可得

$$Y(s)=\frac{1}{s}U(s) \tag{7.26}$$

因此，积分环节的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{1}{s} \tag{7.27}$$

积分环节的方框图如图 7.11 所示。



图 7.11 积分环节的方框图

利用积分环节改善稳态误差

积分环节

在图 7.12 所示的反馈系统中，插入传递函数为 $1/s$ 的**积分环节**。根据终值定理，系统的稳态误差可用式(7.28)求得，即

$$\begin{aligned}\epsilon &=\lim_{s\to 0}sE(s)=\lim_{s\to 0}s\cdot\frac{s(s+1)}{s(s+1)+K}\cdot\frac{1}{s}\\ &=\lim_{s\to 0}\frac{s(s+1)}{s(s+1)+K}=0\end{aligned} \tag{7.28}$$

由式(7.28)可知，插入积分环节后，即使不增大系统增益，稳态误差也可为零。

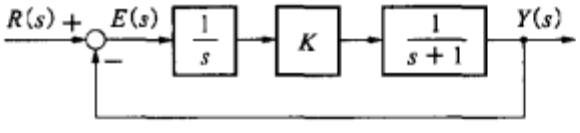


图 7.12 插入积分环节后的反馈控制系统

相关知识

◆ 快速响应特性

稳态误差只能反映经过充分长的时间后被控量与设定值的偏差。设定值与被控量的偏差是逐渐减小的，其减小的速度快、慢也是除稳态误差外，评价系统性能的重要指标之一。这一指标可反映系统的快速响应能力，称为系统的快速响应特性。

◆ 比例环节

以输入 $u(t)$ 的常数倍作为输出 $y(t)$ 的系统可表示为

$$y(t)=Ku(t) \tag{7.29}$$

式(7.29)的拉普拉斯变换为

$$Y(s)=KU(s) \tag{7.30}$$

因此，按比例关系工作的系统传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U(s)}=K \tag{7.31}$$

传递函数为式(7.31)的环节称为比例环节。

◆ 微分环节

以输入 $u(t)$ 的微分作为输出 $y(t)$ 的系统可表示为

$$y(t)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}u(t) \tag{7.32}$$

应用第 7.2 节的拉普拉斯变换，式(7.32)可变换为

$$Y(s)=sU(s) \tag{7.33}$$

因此，按微分关系工作的系统传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U(s)}=s \tag{7.34}$$

传递函数为式(7.34)形式的环节称为微分环节。

◆ PID 反馈控制

将比例环节、微分环节和积分环节组合起来所构成的反馈控制系统称为 PID 反馈控制系统。PID 反馈控制系统的应用十分广泛。由于可以分别调整各环节的增益，因此采用 PID 反馈控制时，对于复杂系统的分析和设计十分方便。

6 稳定性

要 点

稳定性是指当系统中加入有限能量的输入时，保证系统不发散的一种性质。稳定性要求是设计任何一个控制系统时，必须满足的首要条件。

解 释

稳定性的定义

当系统的输入 $u(t)$ 满足有界条件

$$|u(t)|<\infty \qquad (0\leqslant t<\infty) \tag{7.35}$$

时，如果该系统的输出 $y(t)$ 亦满足条件

$$\int_0^{\infty} |y(t)|\mathrm{d}t<0 \tag{7.36}$$

则称该系统是有界输入/输出系统且是稳定的。

单位脉冲函数的定义

满足式(7.35)的有界条件的输入量有无限多种。在判别系统的稳定性时，如果有这样一种函数，它能够代表一切输入量，则会给系统分析带来极大方便。那么，是否存在这样一种函数呢？下面来分析满足式(7.37)的一个特殊函数。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)\mathrm{d}t=1,\ \delta(t)=\begin{cases}\infty & (t=0)\\ 0 & (t\neq 0)\end{cases} \tag{7.37}$$

单位脉冲函数

式中的函数 $\delta(t)$ 称为**单位脉冲函数**。单位脉冲函数的面积为 1、宽度为 0，在 $t=0$ 的时刻能够产生无穷大幅值的脉冲。单位脉冲函数可用图 7.13 所示的箭头来表示。

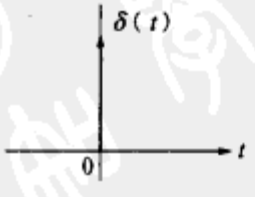


图 7.13 单位脉冲函数

单位脉冲函数的性质

对应任意函数 $f(t)$，单位脉冲函数具有以下性质。

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t)\mathrm{d}t = f(0) \tag{7.38}$$

即单位脉冲函数能够将函数 $f(t)$ 在 $t=0$ 时的值“筛出”。将其进行拉普拉斯变换后可得

$$\int_{0}^{\infty} \delta(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t = \mathrm{e}^{s\cdot 0} = 1 \tag{7.39}$$

如图 7.14 所示，当 $t=\tau$ 时的单位脉冲函数为 $\delta(t-\tau)$，则式(7.40)成立，即

$$\int_{0}^{\infty} \delta(t-\tau)f(t)\mathrm{d}t = f(\tau) \tag{7.40}$$

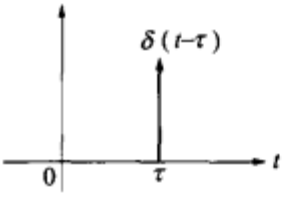


图 7.14　单位脉冲函数的时间偏移

脉冲响应

由式(7.40)可知，单位脉冲函数可以把一个函数在任意瞬间的值“筛”出来。换言之，一个任意函数 $f(t)$ 就是通过积分把**单位脉冲**累积起来的函数。因此，根据**叠加原理**，如果单位脉冲函数的响应是已知的，则对应任意函数的响应就是各瞬间的累积响应。由此可以得出结论：如果系统对应单位脉冲函数输入的响应是不发散的，则系统是稳定的。实际上，以 $g(t)$ 记为系统的脉冲响应时，则式(7.41)成立，即

单位脉冲

叠加原理

$$\int_{0}^{\infty} |g(t)|\mathrm{d}t < \infty \tag{7.41}$$

可以证明，式(7.41)即为系统稳定的充分必要条件。系统对应单位脉冲函数的响应称为**脉冲响应**。由式(7.39)可知，对于传递函数为 $G(s)$ 的系统，其脉冲响应的拉普拉斯变换为

脉冲响应

$$Y(s) = G(s)U(s) = G(s)\cdot 1 = G(s) \tag{7.42}$$

由此可知，系统脉冲响应的拉普拉斯变换等于系统的传递函数。

传递函数的极点与系统的稳定性

对于二阶延迟系统，假设其传递函数的分母多项式具有两个不同的复数根 $p_1=\sigma+j\omega$ 和 $p_2=\sigma-j\omega$，则传递函数 $G(s)$ 可写成

$$G(s)=\frac{1}{(s-p_1)(s-p_2)} \tag{7.43}$$

或

$$G(s)=\frac{1}{(s+\sigma)^2+\omega^2}=\frac{1}{\omega}\frac{\omega}{(s+\sigma)^2+\omega^2} \tag{7.44}$$

利用第 7.2 节的拉普拉斯变换表，可以得到二阶延迟系统在时域内的脉冲响应为

$$g(t)=\frac{1}{\omega}e^{\sigma t}\sin\omega t \tag{7.45}$$

由式(7.45)可知，如果分母多项式的两个根(即极点)的实部全部为负数时，系统的脉冲响应在 $t\to\infty$ 时收敛，则系统是稳定的。一般说来，当传递函数的全部极点都具有负的实部时，就可以保证系统是稳定的。

赫维茨稳定判别

如果传递函数的极点可求，则系统的稳定性就是可知的。但是当系统的阶数较高，即传递函数的分母多项式为高次多项式时，特征方程式的求解将会遇到很大困难。然而，如果只需要了解系统是否稳定，则不必直接求取各个极点，而仅根据分母多项式的系数就可以进行稳定性判别。

赫维茨稳定判别

赫维茨稳定判别就是常用的系统稳定性判别方法之一。

稳定条件

满足特征方程式

$$s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_{n-1}s+a_n=0 \tag{7.46}$$

的全部特征根具有负实部的充分必要条件如下。

① 系数 $a_1,a_2,\cdots,a_n$ 全部存在，并全部为正。

② 以下行列式全部为正。

$$D_1=a_1,\ D_2=\begin{vmatrix}a_1 & a_3\\ 1 & a_2\end{vmatrix},\ D_3=\begin{vmatrix}a_1 & a_3 & a_5\\ 1 & a_2 & a_4\\ 0 & a_1 & a_3\end{vmatrix},\cdots,$$

$$D_n=\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \cdots & a_{2n-1} \\ 1 & a_2 & a_4 & \cdots & a_{2n-2} \\ 0 & a_1 & a_3 & \cdots & a_{2n-3} \\ 0 & 1 & a_2 & \cdots & a_{2n-4} \\ 0 & 0 & a_1 & \cdots & a_{2n-5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_n \end{vmatrix} \tag{7.47}$$

基于上述条件进行系统稳定性判别的方法称为赫维茨稳定判别法。

稳定性判别举例

下面来讨论图 7.15 所示反馈控制系统的稳定性。首先把方框图按第 7.4 节的方法进行化简。简化后该控制系统从设定值到被控量的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{K}{s^3+4s^2+5s+K} \tag{7.48}$$

其特征方程为

$$s^3+4s^2+5s+K=0 \tag{7.49}$$

可以看出，如果 $K>0$，则稳定条件①得到满足。

对于稳定条件有

$$D_1=4>0,\ D_2=\begin{vmatrix} 4 & K \\ 1 & 5 \end{vmatrix}=20-K>0,$$

$$D_3=\begin{vmatrix} 4 & K & 0 \\ 1 & 5 & 0 \\ 0 & 4 & K \end{vmatrix}=K(20-K)>0 \tag{7.50}$$

可以看出，当 $K<20$ 时，稳定条件②得到满足。因此当 $0<K<20$ 时，该控制系统是稳定的，同时也就意味着一旦增益 K 过大，系统将变得不稳定。

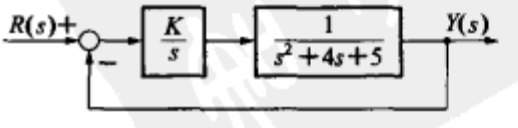


图 7.15　反馈控制系统

相关知识

◆ 劳斯稳定判别

劳斯的稳定条件与使用赫维茨稳定判别的稳定条件及其数学描述完全一样。也就是说，劳斯的稳定条件仍然是利用特征方程式的系数来进行系统的稳定判别。基于劳斯稳定条件来进行系统稳定判别的方法称为劳斯稳定判别法。

◆ 奈奎斯特稳定判别

与劳斯稳定判别法和赫维茨稳定判别法不同，奈奎斯特稳定判别法是一种基于系统频率特性、能够在视觉上直观把握的稳定性判别方法。在图 7.16 中，当控制系统所加输入信号为正弦波时，在某一特定角频率下，具有传递函数为 $G(s)$ 的系统响应是一个与输入信号反相的正弦波。严格地说，必将存在这样一个角频率 ω，使系统开环传递函数的频率响应 $C(j\omega)G(j\omega)$ 的相位差为 180°。因此，如果这时的系统增益大于 1，就会使求和点的正弦波逐渐增大，使系统不稳定。奈奎斯特稳定判别法就是基于上述事实来进行系统的稳定性判别的。

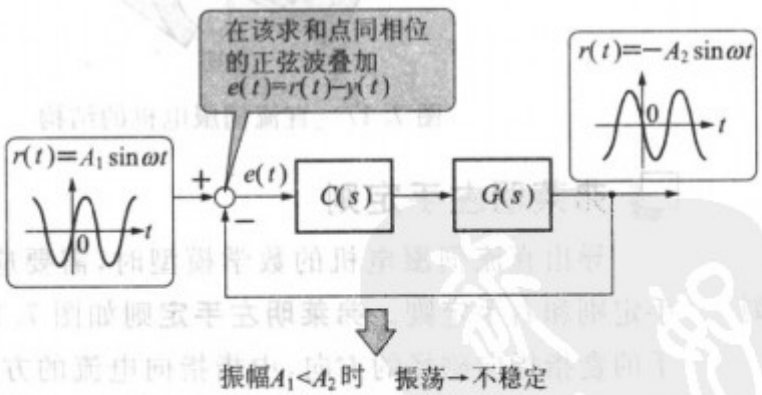


图 7.16 奈奎斯特稳定判别的概念

◆ 增益裕量与相位裕量

由奈奎斯特稳定判别法可知，对应于使输入与输出信号的相位差 $\phi(\omega)$ 为 180°的角频率 ω_x，当开环传递函数的输入/输出增益 $\rho=|C(j\omega_x)G(j\omega_x)|<1$ 时，系统的稳定性会增加。因此，可以用该增益的倒数 $1/\rho$ 来作为衡量系统稳定性的指标。这个指标表明了与增益相关的稳定性裕量，故称为增益裕量。

对应于增益为 1 时的角频率 ω_c，如果使输入与输出的相位差 $\phi(\omega_c)$ 尽可能远离 180°，则系统的稳定性会增强。因此，也可以用 $\phi(\omega_c)$ 与 π 之差作为衡量稳定性的指标，将这个量称为相位裕量。这个角频率 ω_c 称为增益交叉频率。

7　直流伺服电机

要　点

直流伺服电机具有使用简单、控制特性优良等特点，在机电一体化技术中，直流伺服电机作为基本执行装置获得了最为广泛的应用。

解　释

直流伺服电机的结构

电刷　**换向器**
电枢　**电枢电压**

直流伺服电机的简化结构原理如图 7.17 所示。通过**电刷**和**换向器**，给**电枢**提供同一方向的输入电流。定子磁极采用永磁钢。通过改变**电枢电压**来控制电机的速度。

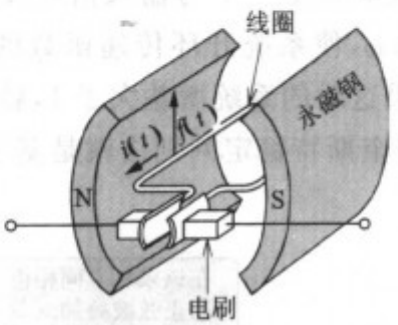


图 7.17　直流伺服电机的结构

弗莱明左手定则

弗莱明左手定则

磁通密度

导出直流伺服电机的数学模型时，需要应用弗莱明左手定则和右手定则。**弗莱明左手定则**如图 7.18 所示，用左手的食指指向磁场的方向，中指指向电流的方向，则大拇指所指的方向即为产生电磁力的方向。设电流为 $i(t)$(A)，**磁通密度**为 B(T)，则电磁力 $f(t)$(N)由式(7.51)确定，即

$$f(t)=BLi(t) \tag{7.51}$$

式中，L(m)为线圈的有效长度。

弗莱明右手定则

弗莱明右手定则如图 7.19 所示。用右手的食指指向磁场的方向，大拇指指向线圈运动的方向，则中指所指的方向即为感生电动势的方向。设线圈运动的线速度为 $v(t)$(m/s)、磁通密度为 B(T)，则感应电动势 $e(t)$(V)由式(7.52)确

定，即

$$e(t)=BLv(t) \tag{7.52}$$



图 7.18 弗莱明左手定则

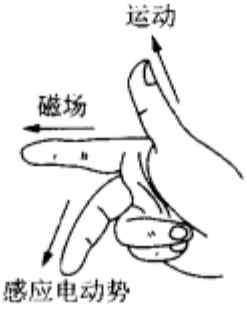


图 7.19 弗莱明右手定则

转矩常数

电机的转矩 $\tau(t)$(N·m)等于电磁力 $f(t)$(N)与电机转子半径 r(m)的乘积，即

$$\tau(t)=rf(t) \tag{7.53}$$

将式(7.51)代入式(7.53)，可得

$$\tau(t)=rBLi(t)=K_t i(t) \tag{7.54}$$

从式中可以看出，电机转矩与电枢电流成正比。将式(7.54)中的比例系数 $K_t=rBL$(N·m/A)称为**转矩常数**。

转矩常数

反电动势常数

电机的**旋转角速度** $\omega(t)=\dot{\theta}(t)$(rad/s)与线圈旋转线速度 $v(t)$(m/s)的关系为

旋转角速度

$$\omega(t)=\frac{v(t)}{r} \tag{7.55}$$

将式(7.55)代入式(7.52)，可得

$$e(t)=rBL\omega(t)=K_e\omega(t) \tag{7.56}$$

可以看出，电枢反电动势与电枢旋转角速度成正比。式(7.56)中的比例系数 $K_e=rBL$(V·s/rad)称为反电动势常数。比较**反电动势常数** K_e 和转矩常数 K_t 可知，二者是完全相同的两个常数，即 $K=K_e=K_t$。

反电动势常数

电枢回路的微分方程

直流伺服电机的电枢回路可以表示成如图 7.20 所示的等效电路，该电路的电压方程式为

$$e_m(t)=L_m\frac{di(t)}{dt}+R_m i(t)+e(t) \tag{7.57}$$

式中，R_m(Ω)为电枢回路电阻；L_m(H)为电枢绕组电感。通常，电感 L_m 远小于其他参数，因此，式(7.57)中的第一项往往可以忽略不计。

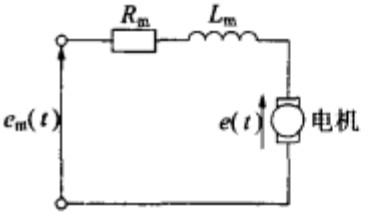


图 7.20　直流伺服电机的等效电路

转矩与负载的关系

转矩与负载的关系可表示为

$$\tau(t)=J_m\frac{d\omega(t)}{dt}+\tau_l \tag{7.58}$$

电机的惯性矩
负载转矩

式中，J_m(kg·m²)为**电机的惯性矩**；τ_l为**负载转矩**。

直流伺服电机的数学模型

在初始值为零的情况下，取式(7.54)、式(7.56)、式(7.57)和式(7.58)的拉普拉斯变换，可得

$$T(s)=K_t I(s) \tag{7.59}$$

$$E(s)=K_e\Omega(s) \tag{7.60}$$

$$E_m(s)=L_m sI(s)+R_m I(s)+E(s) \tag{7.61}$$

$$T(s)=J_m s\,\Omega(s)+T_l(s) \tag{7.62}$$

速度控制时的数学模型

设电机空载运行，即 $T_l(s)=0$，以电枢电压 $e_m(t)$作为输入，以转速 $\omega(t)$作为输出，根据式(7.59)～式(7.62)，电机速度控制时的传递函数 $G_\omega(s)$为：

$$G_\omega(s)=\frac{\Omega(s)}{E_m(s)}=\frac{1}{K_e\left(\frac{L_m J_m}{K_e K_t}s^2+\frac{R_m J_m}{K_e K_t}s+1\right)} \tag{7.63}$$

如果

$$T_m=\frac{R_m J_m}{K_e K_t},\ T_e=\frac{L_m}{R_m} \tag{7.64}$$

则式(7.63)可变形为

$$G_\omega(s)=\frac{1}{K_e(T_mT_es^2+T_ms+1)} \tag{7.65}$$

当 L_m 很小可忽略不计时，式(7.65)可近似写成

$$G_\omega(s)\approx\frac{1}{K_e(T_ms+1)(T_es+1)} \tag{7.66}$$

机械时间常数　式中，T_m 为**机械时间常数**；T_e 为**电气时间常数**。

电气时间常数

位置控制时的数学模型

如果以电枢电压 $e(t)$ 作为输入，角度 $\theta(t)$ 作为输出，有

$$\Omega(s)=s\Theta(s) \tag{7.67}$$

则电机位置控制时的传递函数 $G_\theta(s)$ 为：

$$G_\theta(s)=\frac{1/K_e}{s(T_mT_es^2+T_ms+1)} \tag{7.68}$$

图 7.21 是将式(7.68)所示的数学模型用方框图来描述。

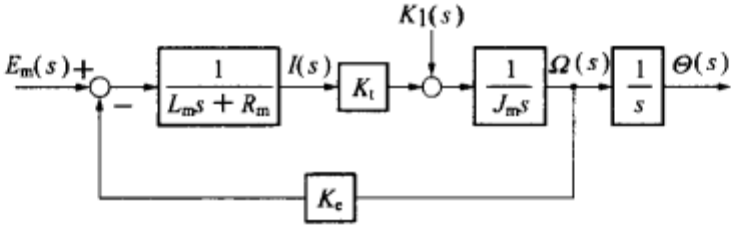


图 7.21　直流伺服电机的方框图

相关知识

◆ 交流伺服电机

伺服电机除直流伺服电机以外，还有交流伺服电机。由于交流伺服电机没有电刷，也避免了因电刷与换向器接触引起的损耗，与直流伺服电机相比，电机的使用寿命较长。但交流伺服电机的电子电路必须要有整流作用，所以结构比较复杂，这也正是交流伺服电机的缺点。

8　液压伺服电机的模型

要　点

对液压伺服电机的控制进行分析和设计时，与直流伺服电机一样也要建立模型，所以，必须首先导出其数学模型。

解　释

伺服阀的结构

伺服阀
力矩电动机
喷嘴挡板阀
引导阀

用手动控制液压装置来改变压力和流量，是不能实现系统自动化的。在自动控制时，需要一种从电信号到液压的变换元件，**伺服阀**就是这种元件。

伺服阀主要由**力矩电动机**、**喷嘴挡板阀**及**引导阀**等部分构成，如图 7.22 所示。

在第 5 章的第 5.18 节中，已经对伺服阀的工作原理作了说明，本节将导出其数学模型。

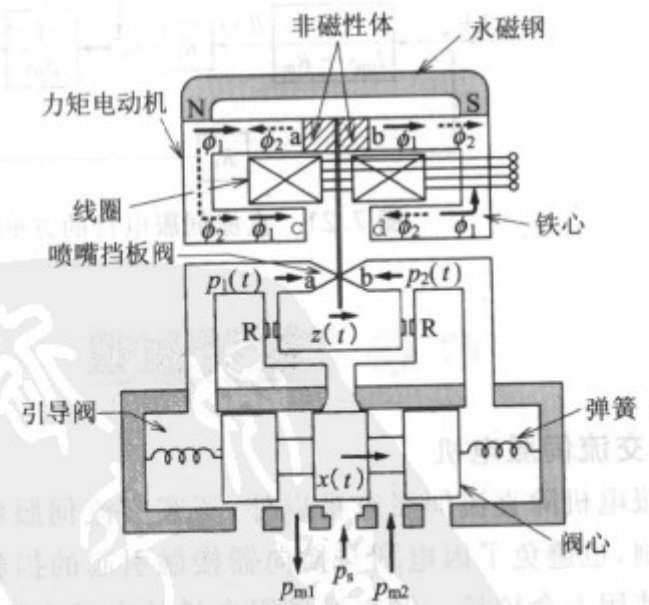


图 7.22　伺服阀的结构

力矩电动机

力矩电动机

力矩电动机的结构如图 7.22 所示。由永磁钢和轭铁构成磁路，产生沿 N→a→b→S 方向和 N→c→d→S 方向通过的磁通 ϕ_1。在力矩电动机内部安装有线圈。当电流 $i(t)$(A) 流过线圈时，产生沿 a→d 方向和 b→c 方向的磁通 ϕ_2。因

此，在 d 点，磁通 ϕ_1 与磁通 ϕ_2 为差动关系；在 c 点，磁通 ϕ_1 与磁通 ϕ_2 为和动关系。如果线圈电流相反，则 d 点与 c 点的这两磁通的关系也相反。

挡板

当**挡板**偏离中间位置而被拉向磁通较大的一方时，挡板所受的力 $f(t)$(N)为：

$$f(t)=KNi(t) \tag{7.69}$$

式中，K 是一个正的常数；N 为线圈匝数。

喷嘴挡板阀

喷嘴挡板阀

节流孔

喷嘴挡板阀的结构如图 7.22 所示。液压源供给的压力 p_s(Pa)通过**节流孔**加到喷嘴 a、b，挡板与喷嘴的间隙越大，挡板越远离喷嘴顶端，则喷嘴的阻力就越小。

设挡板顶端的位移为 $z(t)$(m)，线圈电流为零时，挡板与喷嘴的间隙为 Z(m)，这时的流体阻力为 R。设节流孔的阻力也为 R，则 a、b 喷嘴的阻力 R_a 和 R_b 分别近似为：

$$R_a=\frac{ZR}{Z+z(t)},\quad R_b=\frac{ZR}{Z-z(t)} \tag{7.70}$$

因此，输出口 1 的压力 $p_1(t)$ 和输出口 2 的压力 $p_2(t)$ 分别为：

$$\begin{aligned}p_1(t)&=\frac{\dfrac{Z}{Z+z(t)}R}{R+\dfrac{Z}{+Z+z(t)}R}p_s=\frac{Z}{2Z+z(t)}p_s\\ p_2(t)&=\frac{\dfrac{Z}{Z-z(t)}R}{R+\dfrac{Z}{Z-z(t)}R}p_s=\frac{Z}{2Z-z(t)}p_s\end{aligned} \tag{7.71}$$

两端的压力差 $p_d(t)$ 为：

$$p_d(t)=p_1(t)-p_2(t)=\frac{-2Zz(t)}{4Z^2-z^2(t)}p_s\approx-\frac{z(t)}{2Z}p_s \tag{7.72}$$

式中最后一步简化时，可近似认为 $Z\gg z(t)$。

质量-摩擦-弹簧系统

实际上，挡板是一个**质量-摩擦-弹簧系统**。设其质量为 M_f(kg)、黏性摩擦因数为 D_f(N·s/m)、弹簧刚度为 k_f(N/m)，在与式(7.69)所示的电磁力 $f(t)$ 平衡时，可表示为

$$f(t)=M_f\frac{d^2z(t)}{dt^2}+D_f\frac{dz(t)}{dt}+k_fz(t) \tag{7.73}$$

取式(7.73)、式(7.69)和式(7.72)的拉普拉斯变换并加以整理，以线圈输入电流 $I(s)$作为输入量，以压力差 $p_d(s)$作为输出量时，喷嘴挡板阀的传递函数为

$$G_f(s)=\frac{p_d(s)}{I(s)}=-\frac{1}{2Z}\cdot\frac{KNp_s}{M_fs^2+D_fs+k_f} \tag{7.74}$$

圆柱滑阀

在图 7.22 中，设阀芯的位移为 $x(t)$(m)、质量为 M_v(kg)、黏性摩擦因数为 D_v、弹簧的弹性常数为 k_v、侧面的截面积为 $A(m^2)$，则如下关系成立：

$$Ap_d(t)=M_v\frac{d^2x}{dt^2}+D_v\frac{dx(t)}{dt}+k_vx(t) \tag{7.75}$$

以压力差 $p_d(t)$作为输入量，以圆柱位移 $x(t)$作为输出量，则圆柱滑阀的传递函数为

$$G_v(s)=\frac{x(s)}{p_d(s)}=\frac{A}{M_vs^2+D_vs+k_v} \tag{7.76}$$

伺服阀的传递函数

由式(7.74)和式(7.76)可知，以线圈电流 $I(s)$作为输入量，以圆柱滑动位移 $X(s)$作为输出量时，伺服阀的传递函数为

$$\begin{aligned}G(s)&=G_v(s)G_f(s)=\frac{X(s)}{I(s)}\\&=-\frac{1}{2Z}\cdot\frac{AKNp_s}{(M_fs^2+D_fs+k_f)(M_vs^2+D_vs+k_v)}\end{aligned} \tag{7.77}$$

可以看出，整个伺服阀表现为一个四阶系统。由于挡板的**固有振荡频率**远大于圆柱滑动频率，因此挡板的振荡可忽略不计，这样伺服阀可近似为一个二阶系统，其传递函数为

固有振荡频率

$$G(s)=-\frac{1}{2Z}\cdot\frac{AKNp_s}{M_vs^2+D_vs+k_v} \tag{7.78}$$

液压伺服机构

由于把液压能量转换成旋转能量的执行装置不同，各

轴向活塞马达
活塞泵　缸体

种液压伺服机构也存在着很大差异。其中具有代表性的是**轴向活塞马达**，如图 7.23 所示。由于**活塞泵的缸体**相对中心轴倾斜，活塞将推动倾斜板旋转，流入马达的流量 $q(t)$ 将随倾斜角 $\theta(t)$ 相应变化。设液压马达转过单位弧度的流量为 $D(\mathrm{m}^3/\mathrm{rad})$，则旋转角速度 $\omega(t)$ 与流量 $q(t)$ 的关系为

$$q(t)=D\frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t}=D\omega(t) \tag{7.79}$$

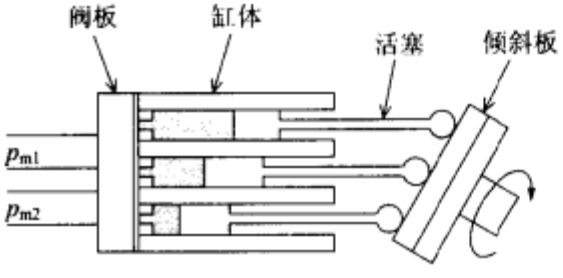


图 7.23　轴向活塞马达的结构

液压马达系统

在图 7.23 所示的轴向活塞马达的引导阀中，近似有以下的关系：

$$p_{\mathrm{m}}(t)=p_{\mathrm{m1}}(t)-p_{\mathrm{m2}}(t)=gx(t)-rq(t) \tag{7.80}$$

式中，g 为压力放大系数；r 为汽缸的内部阻力。液压马达受负载作用时，系统的数学模型可表示为

$$D_{\mathrm{pm}}(t)=J_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}^2\theta(t)}{\mathrm{d}t^2}+B_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t}+\tau_{\mathrm{l}}(t) \tag{7.81}$$

为了使系统的分析计算简化，认为系统管路无泄漏、无压缩。当系统空载，即 $\tau_{\mathrm{l}}(t)=0$ 时，以活塞的位移 $x(t)$ 作为输入量，以液压马达的旋转角 $\theta(t)$ 作为输出量，取式(7.79)、式(7.80)和式(7.81)的拉普拉斯变换并整理，可以得到液压马达系统的传递函数为

$$G(s)=\frac{\Theta(s)}{X(s)}=\frac{gD}{s(J_{\mathrm{m}}s+B_{\mathrm{m}}+rD^2)} \tag{7.82}$$

相关知识

◆ 液压伺服机构

在液压伺服机构中，除轴向活塞马达以外，还有由液压驱动齿轮旋转的液

压齿轮马达，采用椭圆形凸轮圈的叶片马达等。

◆ **射流管伺服**

把电气信号变换成液压信号的元件中，除伺服阀以外，还有使用可动线圈的射流管伺服装置。射流管伺服主要用于输入信号变化较缓慢的场合。

9　顺序控制原理

要　点

顺序控制是指按照预先确定的顺序使控制过程的各步骤依次进行的一种控制。

解　释

用于顺序控制的电器

当进行顺序控制时，需要使用很多种类的电器，主要有各种**开关**、**继电器**和**时间继电器**等。

开关　继电器
时间继电器

手动操作开关

手动操作开关
恢复型主令开关
保持型主令开关

手动操作开关可以分为**恢复型主令开关**和**保持型主令开关**两种。前者仅在施加手动操作时触点的开闭状态才会发生变化，即只有在操作时，触点才处于断开状态或闭合状态，如图 7.24 所示。而对于保持型主令开关来说，一般进行操作后到反方向操作之前，触点将始终保持断开或闭合的状态，如图 7.25 所示。

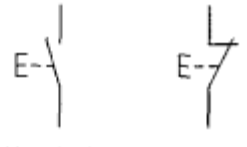


图 7.24　恢复型开关的图形符号

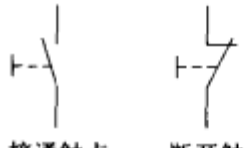


图 7.25　保持型开关的图形符号

检测开关

检测开关
微动开关

检测开关用于位置、位移、速度、压力和温度等的检测，如位置检测中广泛使用**微动开关**等。图 7.26 所示为检测开关的一般图形符号。



图 7.26　检测开关的图形符号

控制用继电器(有触点继电器)

控制用继电器

控制用继电器是一种中继元件,在输入电气信号的ON-OFF动作控制下产生出新的电气信号的ON-OFF动作,从而把小功率的ON-OFF动作变换成大功率的ON-OFF动作。控制用继电器一般按照输入反转、多信号输出、延时输出等功能进行分类。

恢复型继电器

由励磁线圈的励磁和消磁来完成触点的ON-OFF动作,这种ON-OFF动作功能与手动的恢复型主令开关类似。

恢复型继电器

恢复型继电器只有在电磁线圈励磁的情况下才能动作,一旦消磁则立即恢复到原来的状态。与恢复型主令开关相同,当继电器动作时,触点处于断开状态或闭合状态。图7.27所示为电磁线圈与a触点和b触点组合所使用的图形符号。

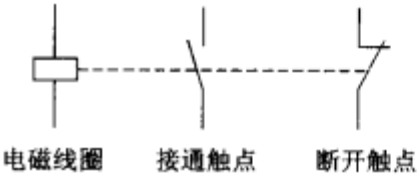


图7.27　恢复型继电器的图形符号

保持型继电器(记忆型继电器)

保持型继电器

与手动保持型主令开关的动作一样,**保持型继电器**的动作是依靠励磁线圈和消磁线圈来完成的。一旦励磁线圈产生动作,其动作状态一直会保持到消磁线圈动作之前。

动作用电磁线圈
恢复用电磁线圈

图7.28所示为**动作用电磁线圈**、**恢复用电磁线圈**及其触点组合所使用的图形符号。

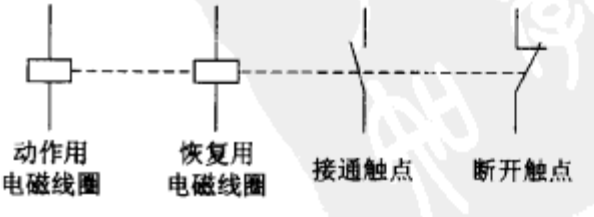


图7.28　保持型继电器的图形符号

时间继电器(定时器)

时间继电器

时间继电器可以起到定时器的作用,即从动作条件具备起到输出触点开闭为止产生时间上的延迟。如图 7.29 所示,根据对时间继电器的 a 触点与 b 触点的断开或闭合的时间延迟,可构成四种组合方式。时间继电器的图形符号如图 7.29 所示。



图 7.29 时间继电器的图形符号

无触点继电器

前面所述的电磁继电器均具有机械上的可动触点,称为**有触点继电器**。而**无触点继电器**是使用晶体二极管和晶体三极管等电子开关在无机械触点的情况下来完成继电动作。由于没有机械上的可动触点,无触点继电器具有使用寿命长、可靠性高、响应速度快以及可以把复杂电路小型化等一系列优点。

有触点继电器

无触点继电器

相关知识

◆ 过载保护继电器

当电路中的负载电流超过某一定值并维持一定时间后,继电器的触点就会因过载而开、闭,这种继电器称为过载继电器。一般使用热过载继电器。热过载继电器主要由用于开、闭触点的双金属片构成,构成双金属片的两种金属具有不同的热膨胀系数。当有负载电流流过并超过额定值时,由于电阻发热,会使双金属片发生弯曲变形而使触点开、闭。

◆ 步进继电器

在脉冲电流的作用下,多个触点依次切换的继电器称为步进继电器。有一个脉冲输入时,继电器触点切换一次(一步),因此可以根据脉冲数选择对应的触点。

◆ **反馈控制与顺序控制**

在使用多台机器人来制造产品时，希望每台机器人各自分担一部分工作来提高生产效率。这时，对于每一台机器人采用反馈控制方式来完成位置控制或力的控制。而对于整个机器人群体，首先应确定遵循一定顺序的作业流程，即采用顺序控制进行各个机器人的启动、制动控制。因此，为了实现复杂制造过程的自动化，必须实行反馈控制与顺序控制的组合控制。

10　顺序控制中的逻辑电路

要　点

顺序控制中的逻辑电路是指把 ON-OFF 控制变换成 2 值电平信号，并进行逻辑运算的电路。

解　释

ON-OFF 控制与逻辑运算

顺序控制基本上由 ON-OFF 动作构成。因此，如果把 ON 和 OFF 变换成 0 和 1，就可以用逻辑运算来描述顺序控制。这里的 0 和 1 与计算机内部使用的基本逻辑单位的 0 和 1 是完全一样的。

基于继电器的逻辑运算基本单元

逻辑“与”
逻辑“或”
逻辑“非”

一般说来，在进行逻辑运算时，顺序控制可以由**逻辑“与”**、**逻辑“或”**及**逻辑“非”**等三种基本逻辑单元构成（参照第 2 章第 2.14 节）。

逻辑“与”的实现

“与”(AND)电路

用继电器来实现**“与”(AND)电路**时，如图 7.30 所示。由图中可知，只有开关 A 与开关 B 同时 ON 时，继电器线圈才得电，触点 X 才接通。这时两个开关串联就构成了“与”(AND)电路。



图 7.30　实现逻辑“与”的继电器

逻辑“或”的实现

“或”(OR)电路

用继电器来实现**“或”(OR)电路**时，如图 7.31 所示。由图中可知，如果开关 A 和开关 B 中的任何一个开关处于 ON 状态，继电器线圈就会得电，则 X 触点就会接通。因此，两

个开关并联就实现了逻辑“或”(OR)电路。

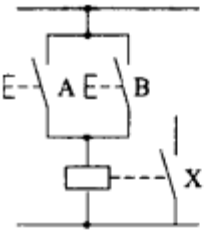


图 7.31　实现逻辑“或”的继电器

逻辑“非”的实现

“非”(NOT)电路

用继电器实现“非”(NOT)电路时，如图 7.32 所示。

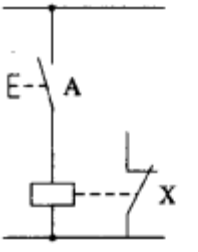


图 7.32　实现逻辑“非”的继电器

逻辑“与非”的实现

“与非”(NAND)电路

用继电器实现“与非”(NAND)电路时，如图 7.33 所示。由图中可知，如果开关 A 与 B 中任何一个为 OFF 状态时，线圈将失电，则 X 触点接通；如果开关 A 与开关 B 同时为 ON 状态时，线圈得电，则 X 触点断开，这样就实现了逻辑“与非”电路。



图 7.33　实现逻辑“与非”的继电器

逻辑“或非”的实现

“或非”(NOR)电路

用继电器实现“或非”(NOR)电路时，如图 7.34 所示。

由图中可知，如果开关 A 与开关 B 同时为 OFF 状态时，线圈将失电，则 X 触点接通；开关 A 或开关 B 中有一个为 ON 状态，则 X 触点断开。可见该电路实现了逻辑“或非”。

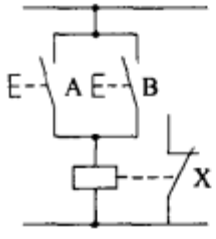


图 7.34　实现逻辑“或非”的继电器

相关知识

◆ 触发器电路与顺序电路

实现保持型继电器功能的无触点继电器电路称为计数器型触发器电路，这种电路每给出一个输入脉冲，其输出就交替翻转一次。将触发器与通常的逻辑电路组合起来，由原输入和现输入共同决定其输出状态，这种电路称为时序电路。用这种时序电路可以构成计数器和移位寄存器等。

11　逻辑电路的简化

要　点

逻辑电路是一种用2值信号“0”和“1”进行逻辑运算的电路。其中的“0”和“1”是基本逻辑单位。

解　释

逻辑代数

通过逻辑“与”、逻辑“或”和逻辑“非”三种基本逻辑单元的组合，可以实现任何复杂的逻辑运算。当给出了某一真值表时，要实现这一真值表并非只有一种基本逻辑单元的组合方式。也可以根据自己的设计，使其构成非常复杂。

为了简化装置和降低成本，总希望使用尽可能少的元件来构成电路。因此，需要运用逻辑运算法则，进行逻辑关系式的变换。

这种运用逻辑运算法则所进行的逻辑变换称为逻辑代数。**逻辑代数**与通常的代数运算不同，由于不存在基本逻辑单位“0”和“1”以外的数，所以如第2章14节所述的那样，其运算法则简单易懂。

逻辑代数

逻辑关系式的简化

可以利用第2章第2.14节所介绍的法则进行逻辑关系式的简化。例如，对以下逻辑式进行简化。

$$X=A\cdot B\cdot \overline{C}+A\cdot \overline{B}\cdot \overline{C}+A\cdot \overline{B}\cdot C+\overline{A}\cdot B\cdot \overline{C} \tag{7.83}$$

首先，根据分配律，式(7.83)右边可变形为

$$X=A\cdot \overline{B}(C+\overline{C})+(A+\overline{A})\cdot B\cdot \overline{C} \tag{7.84}$$

其次，根据互补律，可最后化简为

$$X=\overline{A}\cdot \overline{B}+B\cdot \overline{C} \tag{7.85}$$

逻辑电路的实现

为了实现式(7.83)，需要8个逻辑“与”电路和3个逻辑“或”电路。而要实现同样的逻辑运算，根据式(7.85)就只需要如图7.35所示的2个逻辑“与”电路和1个逻辑“或”电路就可以实现。这就是说，有时通过对逻辑式的简化，可以

大幅度减少电路中所用元件数和配线量。

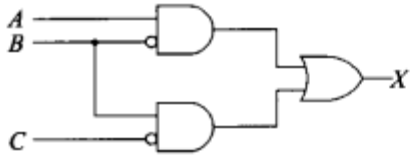


图 7.35　简化后的逻辑电路

相关知识

◆ 卡诺图

所谓卡诺图就是把对应于逻辑变量组合的运算结果填入一个方格矩阵中，这样容易把握逻辑式的特征，使逻辑式的化简过程简单、直观。但是，若变量数很多时，卡诺图将变得很庞大，失去了简单、直观的优点，因此，很少在化简复杂的逻辑式时应用。

例 题

简化以下逻辑式并绘出所得简化逻辑式的逻辑电路。

① $X=A\cdot B\cdot C+A\cdot \overline{B}\cdot C+A\cdot B\cdot \overline{C}$

② $X=A\cdot \overline{B}\cdot C+A\cdot \overline{B}\cdot \overline{C}+\overline{A}\cdot B\cdot C+\overline{A}\cdot \overline{B}\cdot \overline{C}$

答　① $X=A\cdot B\cdot C+A\cdot \overline{B}\cdot C+A\cdot B\cdot \overline{C}$

$=A\cdot B\cdot C+A\cdot \overline{B}\cdot C+A\cdot B\cdot C+A\cdot B\cdot \overline{C}$

（根据重叠律）

$=A\cdot (B+\overline{B})C+A\cdot B\cdot (C+\overline{C})$　（根据分配律）

$=A\cdot C+A\cdot B$　（根据互补律）

$=A\cdot (B+C)$　（根据分配律）

实现上式的逻辑电路如图 7.36 所示。

② $X=A\cdot \overline{B}\cdot C+A\cdot \overline{B}\cdot \overline{C}+\overline{A}\cdot B\cdot C+\overline{A}\cdot \overline{B}\cdot \overline{C}$

$=(A\cdot \overline{B}\cdot C+A\cdot \overline{B}\cdot \overline{C})+\overline{A}\cdot B\cdot C+(\overline{A}\cdot \overline{B}\cdot \overline{C}+A\cdot \overline{B}\cdot \overline{C})$

（根据重叠律）

$=A\cdot \overline{B}\cdot (C+\overline{C})+\overline{A}\cdot B\cdot C+(A+\overline{A})\cdot \overline{B}\cdot \overline{C}$　（根据分配律）

$=A\cdot \overline{B}+\overline{A}\cdot B\cdot C+\overline{B}\cdot \overline{C}$　（根据互补律）

实现上式的逻辑电路如图 7.37 所示。

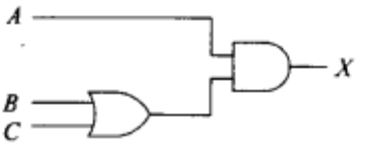


图 7.36　实现例题①的简化逻辑电路

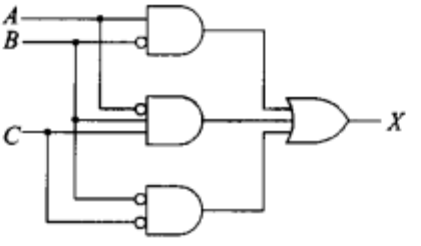


图 7.37　实现例题②的简化逻辑电路

12 顺序控制例

要 点

顺序控制的应用十分广泛。从大的方面来说，在发电系统、工厂的流水作业自动化系统等复杂系统中普遍应用了顺序控制；从小的方面来说，在全自动洗衣机和电饭锅等家用电器中也使用了顺序控制方法。

解 释

从两个地点用继电器对一台电动机进行控制

恢复型开关
恢复型继电器

从两个地点对一台电动机进行控制时，可以用 2 个双联**恢复型开关**和一个**恢复型继电器**来实现，如图 7.38 所示。图中 A_1B_1 为一个双联开关，A_2B_2 为另一个双联开关。当按下开关 A_1 或 A_2 时，继电器的电磁线圈得电，触点 X 闭合，电动机接通电源；当按下开关 B_1 或 B_2 时，继电器线圈电路被切断，触点 X 断开，电动机停止供电。

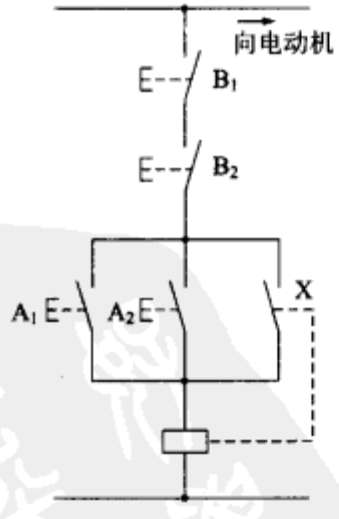


图 7.38 从两个地点控制一台电动机的继电器电路

在机器人装配操作中的应用

如果要将如图 7.39 所示的三个梯形积木块搭成金字塔形，试考察由机器人来完成这一简单的装配操作过程。假定梯形块随意地放在图 7.40 所示的传送带上，与传送带一起移动。当某一个梯形块到达 A 点时，由上方的摄像机负责识别。

机器人要不断检查装配中的金字塔的状态，当所需的梯形块随传送带到达 A 点时，就及时抓起，并进行金字塔装配操作。金字塔装配完成后，由传送带 2 送出。在完成摄像机的识别和梯形块的堆砌、取下动作时，由于传送带的移动十分缓慢，即使不进行停止和运行控制，上述工作也不会受到影响。

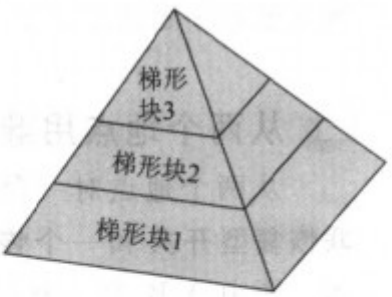


图 7.39　搭成的金字塔

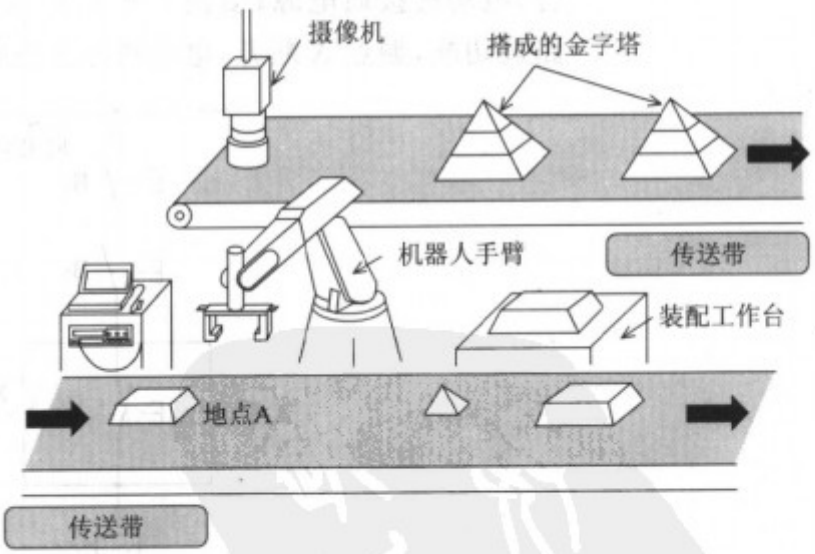


图 7.40　机器人手臂的装配操作

关于输入与状态的分析

现将机器人正常工作所需的输入与状态的信息整理如下。

首先，由安装在地点 A 上部的摄像机来识别位于传送带上的梯形块的种类。由于梯形块的种类有三种，加上无梯形块的情况，应该识别以下四种输入。

输入①：无梯形块(0 的二进制数为 00)。

输入②：梯形块 1(1 的二进制数为 01)。

输入③：梯形块 2(2 的二进制数为 10)。

输入④：梯形块 3(3 的二进制数为 11)。

这时还需要进一步了解在装配工作台上的梯形块的装配情况以及金字塔完成到何种程度。为此可以考虑下列四种状态。

状态①：无梯形块(0 的二进制数为 00)。

状态②：只有梯形块 1(1 的二进制数为 01)。

状态③：有梯形块 1 和 2(2 的二进制数为 10)。

状态④：金字塔完成(3 的二进制数为 11)。

机器人动作分析

下面就对机器人的动作加以整理。为了简单起见，对三种梯形块的抓起动作不加区别，而全部使用同样的指令来完成。这样，可以认为有下面的两种动作。

动作①：从传送带 1 抓起梯形块，放置到装配工作台上或正在装配中的金字塔上。

动作②：将装配完成的金字塔从装配工作台上抓起，送到传送带 2 上。

不进行这两种动作时，机器人处于预先确定的静止状态。

机器人的动作

机器人的动作①和动作②取决于机器人的输入与状态，可以分别根据表 7.2 和表 7.3 所示的真值表来进行选择。表中用来表示机器人输入与状态的二进制数的上位数和下位数分别用(*A*,*B*)、(*C*,*D*)这四个逻辑变量给出。根据传送带 1 上的梯形块和装配工作台上的金字塔的状态来决定是否进行动作①。当装配工作台上的金字塔装配完成时，则进行动作②。

表 7.2　决定动作①的真值表

A	B	C	D	X_1	
0	0	0	0	0	
0	0	0	1	0	
0	0	1	0	0	
0	0	1	1	0	
0	1	0	0	1	← 工作台上:无 传送带上:梯形块
0	1	0	1	0	
0	1	1	0	0	
0	1	1	1	0	
1	0	0	0	0	
1	0	0	1	1	← 工作台上:梯形块1 传送带上:梯形块2
1	0	1	0	0	
1	0	1	1	0	
1	1	0	0	0	
1	1	0	1	0	
1	1	1	0	1	← 工作台上:梯形块2 传送带上:梯形块3
1	1	1	1	0	

表 7.3　决定动作②的真值表

C	D	X_2
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

电路的实现

表 7.2 所示的真值表可用逻辑关系式描述为

$$X_1=\overline{A}\cdot B\cdot\overline{C}\cdot\overline{D}+A\cdot\overline{B}\cdot\overline{C}\cdot D+A\cdot B\cdot C\cdot\overline{D}$$

因此,决定是否进行动作①的电路如图 7.41 所示。

表 7.3 所示的真值表可用逻辑关系式描述为

$$X_2=C\cdot D$$

因此就可以用图如 7.42 所示的电路来实现动作②。

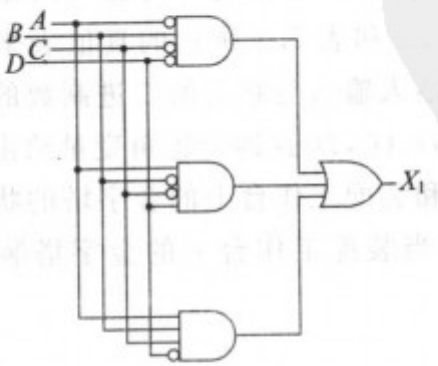


图 7.41　决定动作①的逻辑电路



图 7.42　决定动作②的逻辑电路

第 8 章

机器人技术

● 责任编委
久慈俊夫
● 执　笔
村田直史(1~4)
大西典子(5~7)
光畑幸史(5~7)
加藤典之(8)
久慈俊夫(9,10)

日本具有享誉世界的机器人技术，素有“机器人王国之称”。在未来的发展中，机器人技术被人们寄予厚望。

目前，工业机器人已进入实用化阶段，工业机器人包含了机电一体化技术中的全部要素，然而完整地介绍有关机器人设计技术的资料却为数很少。

本章将从可用于工业和学习的多用机器人中，选取垂直7轴多关节机器人“PA-10”为例，具体介绍机器人实现技术。

为了加深对机器人技术应用的理解，还将介绍有关结构设计、控制技术、外部设备与视觉传感器的连接技术以及在生产现场使用时的安全技术等。

1　机器人的种类与构造

要　点

机器人技术是一种综合性的机电一体化技术，包括传动机构、伺服控制、数据处理、人机对话以及与机器人工作性质对应的控制功能等。目前使用的工业机器人从机械结构上看可分为以下四种类型：

① 直角坐标系机器人。

② 圆柱坐标系机器人。

③ 水平多关节机器人。

④ 垂直多关节机器人。

解　释

机器人的历史

人体形自动机械

用**人体形自动机械**来代替人工作始终是人类的一个梦想。自古以来人们就以极大的兴趣研究机器人，如中世纪时的时钟机构中的八音盒、人形自动装置等。20世纪70年代微型计算机的发明，使**计算机**技术、**伺服**技术与**机械**技术这三种技术有可能融为一体。进入80年代，日本的汽车工业、电机制造业等领域开始大量地采用了工业机器人。

计算机　伺服　机械

“机器人”一词的来源

捷克剧作家卡里洛·奇别克的剧本《罗萨姆万能机器人制造公司》(Rossum's Universal Robots，1920)中首先使用了“机器人”一词，意思是“人造的人”。

人造的人

工业机器人的出现

工业机器人

① 1960年，美国报纸《美国金属市场》(American Metal Market)中使用了**工业机器人**一词。

② 1954年，“工业机器人”的概念在乔治 C. 德沃尔(美国)申请的专利“Programmed Article Transfer”(1961年注册)中提出。

③ 1962年，美国UNIMATIDN公司和AMF公司分别推出了实用机型“UNIMATE”和“VERSTRAN”。

④ 1967年，为了解决劳动力短缺问题，日本汽车制造

业引进了美国的实用化机械手。

⑤ 20 世纪 70 年代，以美国为中心进行了手、眼结合的机械手系统和装配自动化系统的研究，机器人技术已发展到**多关节机器人**的计算机控制技术阶段。

多关节机器人

⑥ 1975 年石油危机后，日本的机器人产业界将迅速发展的微型计算机应用于机器人控制领域，实现了多关节工业机器人控制的低成本化。

⑦ 1975 年起，日本的汽车制造业为使产品多样化及弥补劳动力的不足，大量引进了电弧焊接机器人和点焊机器人。在电机制造业中，也大量引进了**水平多关节机器人**(SCARA：Selective Compliance Assembly Robot Arm)用于装配生产线。可以说，1980 年是机器人普及之年。

水平多关节机器人

工业机器人的定义

根据“工业机器人名词术语”(JIS B 0134：1998)，工业机器人的定义为“具有**自动控制**的**操作功能**和**移动功能**，能够按照程序实施各种作业的用于工业的机械”。该定义有以下意义。

自动控制
操作功能
移动功能

① 所谓“自动控制的操作功能”是指“在自动控制下完成操作”的功能。

② “移动功能”可为步行、无轨道、有轨道等各种形态。

③ 所谓“能够按照程序实施”是指操作能够程序化(programmable)，如果变更程序则可以进行其他的操作。

相关的国际标准有 ISO 8373“Terminology”。

机器人的结构

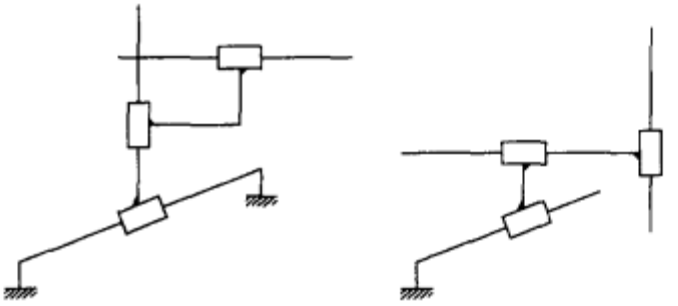
一般情况下，按照**旋转轴**或**直线运动轴**的配置对机器人的结构进行分类。下面就不同结构的机器人的特点和用途加以说明(图中的符号请参照第 3 章第 3.1 节的表 3.1)。

旋转轴
直线运动轴

直角坐标系机器人 直角坐标系机器人的结构是具有相互正交的二个或三个直线移动轴(见图 8.1)。

直角坐标系机器人的优点是结构简单、精度高；缺点是在相同的动作范围内，机器人的占地面积大，设备的空间因数较差。主要用于印制电路基板的元件插入和紧固螺钉等。

圆柱坐标系机器人　从结构上来说，圆柱坐标系机器人在地面上有可旋转的旋转轴，在旋转轴上有能够上下移动的轴，端部有前后运动的轴（见图 8.2）。



(a) 直角坐标系机器人
(3自由度)
X-Z-Y

(b) 直角坐标系机器人
(3自由度)
X-Y-Z

图 8.1　直角坐标系机器人的机械构成

其优点是结构简单、刚性好；缺点是在机器人动作范围内，必须留有前后方向运动的空间，因此空间利用率较差。

装卸

主要用于重物的**装卸**等。

水平多关节机器人　在日本，水平多关节机器人是一种提倡推广的机器人。这种机器人在结构上具有串联配置的两个能够在水平面内旋转的手臂（见图 8.3）。

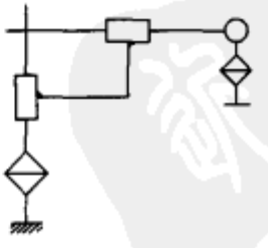


图 8.2　圆柱坐标系机器人的机械构成

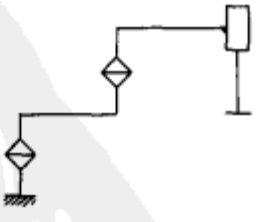


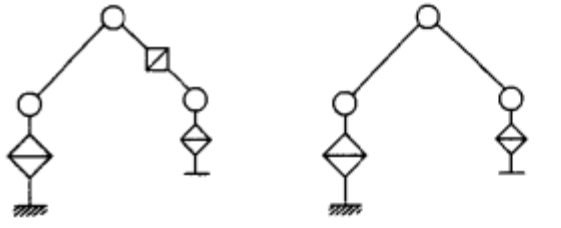
图 8.3　水平多关节机器人的机械构成

水平多关节机器人的优点是在垂直方向上的刚性好，是一种用来代替专用装配机械的常用自动化机械。其自由度可以根据用途选择 2～4 个自由度，常用于电气电子零、

SCARA

部件或汽车零、部件等的装配流水线上，称为 **SCARA**（Selective Compliance Assembly Robot Arm）。

垂直多关节机器人　垂直多关节机器人模拟了人类的手臂功能。由垂直于地面的腰部旋转轴(相当于大臂旋转的肩部旋转轴),带动小臂旋转的肘部旋转轴及小臂前端的手腕等构成(见图 8.4)。手腕通常有 2～3 个自由度。



(a) 垂直多关节机器人(6 自由度)　　(b) 垂直多关节机器人(5 自由度)

图 8.4　垂直多关节机器人的机械构成

垂直多关节机器人的优点是可以自由地实现三维空间的各种姿态,可以生成各种复杂形状的轨迹。相对机器人的安装面积,其动作范围很宽。其缺点是结构刚度较低,动作的绝对位置精度较低。它广泛应用于代替人完成装配作业、货物搬运、电弧焊接、喷涂及点焊接等场合。

相关知识

◆ JIS 的控制分类

日本国家标准 JIS 中的机器人控制的分类为顺序控制机器人、机械手机器人、数字控制机器人、智能机器人、感觉控制机器人、自适应控制机器人、学习控制机器人及远距离操纵机器人等。

◆ JIS 的机械结构形式分类

JIS 标准中机器人按机械结构形式分类为直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、极坐标机器人、多关节机器人、标量机器人、雷达天线机器人、振子机器人和脊柱机器人等。

◆ 机器人的机械结构

机器人由旋转机构(枢轴)、直线机构(导轨)和臂杆(连杆)等构成。机械结构的图示方法在《工业机器人图示符号》(JIS B 0138:1996)中作了规定。

◆ 自由度

自由度(degrees of freedom)是表示机器人动作难易程度的用语,通常自由

度的数目就是能够控制的独立变量的数目。图8.3所示的SCARA机器人有3个自由度，该机器人能够控制水平位置和高度这三维变量。

图8.5至图8.9所示为机器人应用的例子。

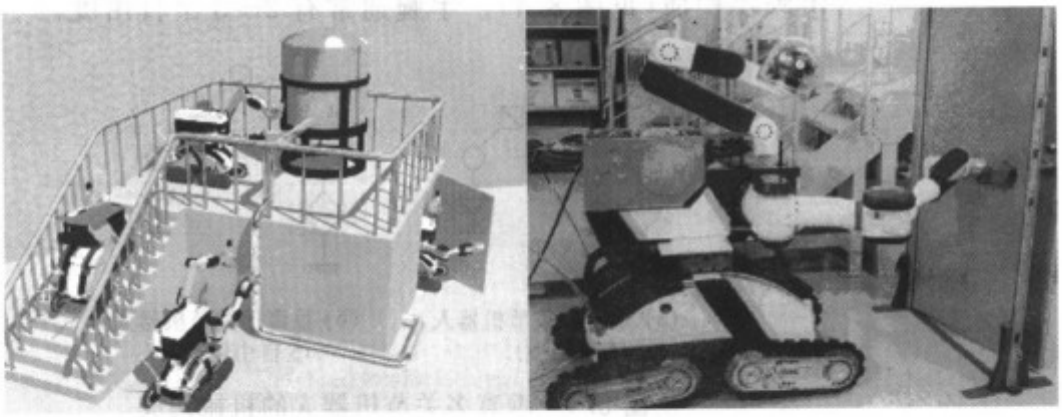


图8.5　在核电站等场所处理事故用灾害救助机器人
（使用7关节手臂和先进工具，能够进行开、关门等各种操作）

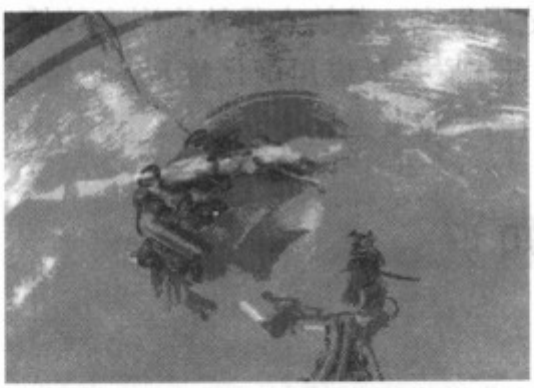


图8.6　对核反应堆焊接部位进行超声波检查的机器人



图8.7　对核反应堆进行维护的智能维护机器人



图8.8　研究与人类协调动作的机器人
（东北大学机械智能学科）

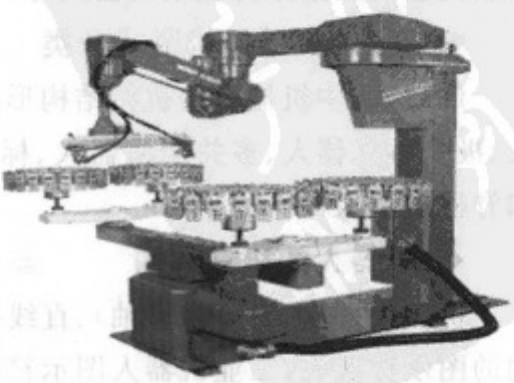


图8.9　工业用涂装机器人

2 机器人的结构分析

要 点

在机器人进行作业时，需要让机器人的各个手臂动作，使手爪向作业位置移动。为此，必须了解手臂的关节角度与手爪位置的几何学关系，这种关系称为运动学。

解 释

位置与姿态

位置 姿态

为了进行机器人的解析，首先需要对空间的**位置**与**姿态**加以定义。

基准坐标系

位置就是从某**基准坐标系**所看到的位置矢量(x, y, z)。进行机器人分析时，仅有位置矢量还是不够的。人类在抓持物体时，需要考虑对应不同物体时的抓持方向(从上面抓持还是从横向抓持等)。同样，对机器人来说，也必须明确指示机器人的手爪应从哪一个方向去抓持目标。一般说来，与位置一样，手爪的任意方向，也就是姿态，可以用三要素(ψ, θ, ϕ)的形式来表示。

目标坐标系

位置与姿态的概念如图 8.10 所示。在基准坐标系 O_1-$X_1Y_1Z_1$ 中有一个**目标坐标系** O_2-$X_2Y_2Z_2$。用基准坐标系表示目标坐标系时，若从基准坐标系的原点 O_1 指向目标坐标系的原点 O_2 的矢量为(x, y, z)，如果任意旋转 O_1-$X_1Y_1Z_1$，则用(ψ, θ, ϕ)表示的姿态与用 O_2-$X_2Y_2Z_2$ 表示的姿态，其二者是一致的。这就是在第 8.3 节中将要叙述的欧拉角等。

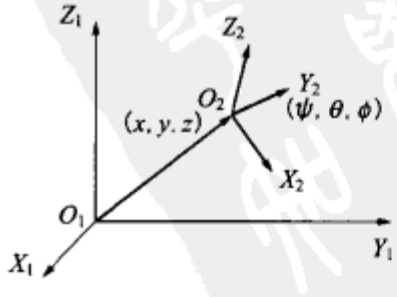


图 8.10 位置与姿态的表示方法

在机器人中，用位置矢量(x,y,z)加上表示姿态的三要素(ψ,θ,ϕ)来表示位置和姿态。这是一个六维信息，为了与一般概念的“点”与“位置”加以区别，称之为**姿态**(pose)。

姿态

机器人的坐标系

表示机器人的位置与姿态时，需要定义一个作为基准的坐标系。为了表示机器人的动作，可以定义如图 8.11 所示的坐标系。

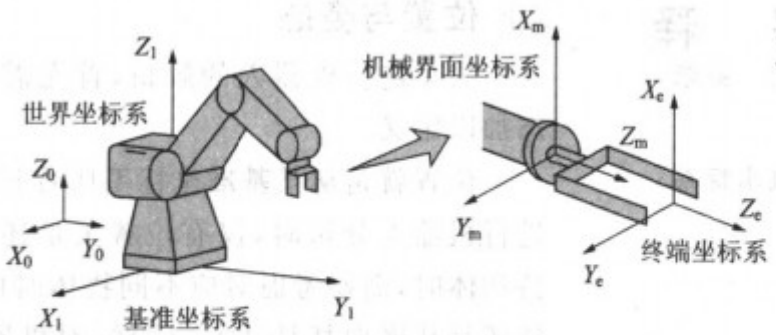


图 8.11　机器人的坐标系

世界坐标系

① **世界坐标系**：这种坐标系与机器人无直接关系，可以以地面或作业平面为基准来设定坐标系。坐标原点和坐标轴由使用者决定。

基准坐标系

② **基准坐标系**：以机器人的基座底面为基准设定的坐标系，也称为机器人坐标系。坐标原点由机器人制造者决定。

机械界面坐标系

③ **机械界面坐标系**：设定作为手爪安装面的机械界面的坐标系，其坐标原点为机械界面的中心点。

终端坐标系

④ **终端坐标系**：设定作为机器人手爪或手爪终端的坐标系。所谓手爪就是安装于机械界面的工具，因此也称为工具坐标系。

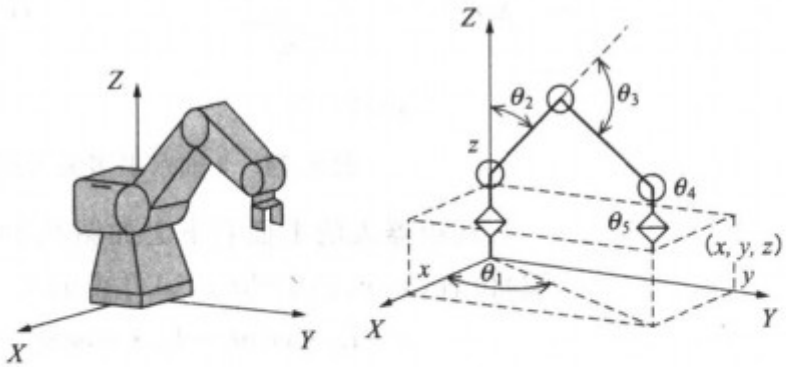
以上述坐标系为基础来表示机器人的位置和姿态。一般情况下，以世界坐标系作为基准坐标系来考虑终端坐标系的位置姿态。而多数情况下，世界坐标系与基准坐标系是同一坐标系。

正运动学与逆运动学

图 8.12 是 5 轴多关节机器人。为了从几何上分析机器人的结构，可以用图 8.12(b)来表示。用这个图来进行各轴

关节角度
位置姿态
运动学
正运动学
逆运动学

的**关节角度**与机器人的末端(机械界面或手爪端)的**位置姿态**之间关系的研究称为机器人**运动学**。从关节角度出发来求取末端的位置姿态称为**正运动学**;从末端位置姿态出发来求取关节角度称为**逆运动学**(见图 8.13)。在第 8.3 节和第 8.4 节中还要详细地阐述运动学,在此只是通过简单的例子介绍水平多关节机器人的运动学。



(a)外 形　　(b)机 构

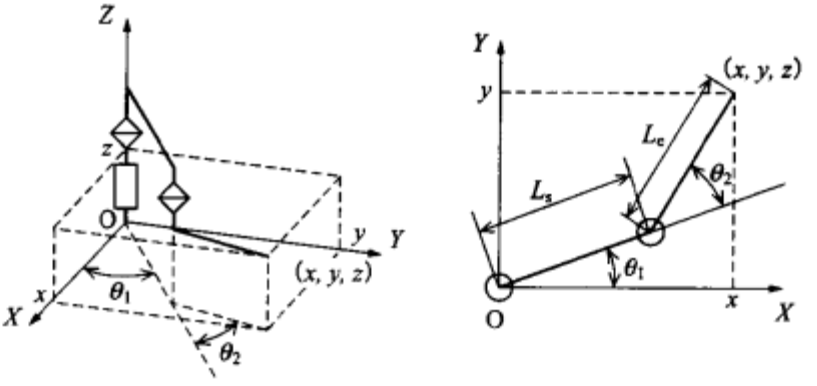
图 8.12　5 轴多关节机器人



图 8.13　正运动学与逆运动学

水平多关节机器人的正运动学

图 8.14 所示为 3 轴水平多关节机器人的结构及关节角的定义。图中的坐标系为基准坐标系。机器人由沿水平方向的两个旋转轴和垂直方向的直线运动轴这三个轴构成。在水平方向的二个轴中,基座侧的为第一轴,末端侧的为第二轴,第一轴长度为 L_a,第二轴长度为 L_e。关节角 θ_1 为从 X 轴到第一轴的水平夹角,关节角 θ_2 为从第一轴的延长线到第二轴的夹角,均取逆时针方向为关节角度的正方向。Z 轴为垂直方向的移动量,取机器人的基座底面为原点 O,向上的方向为正方向。根据图 8.14 可以导出用关节角和移动量(θ_1,θ_2,Z)表示的求取末端位置(x,y,z)的公式。



(a)机　构　　(b)关节角定义

图 8.14　3 轴水平多关节机器人结构

从机器人的上面看下去如图 8.14(b)所示。末端(手爪端)位置(x,y,z)中的(x,y)可表示为

$$x=L_s\cdot\cos\theta_1+L_e\cdot\cos(\theta_1+\theta_2) \tag{8.1}$$

$$y=L_s\cdot\sin\theta_1+L_e\cdot\sin(\theta_1+\theta_2) \tag{8.2}$$

由于 Z 轴为直线运动轴，因此可直接表示成

$$z=Z \tag{8.3}$$

水平多关节机器人的逆运动学

图 8.15 所示为机器人的末端(手爪端)与关节角的关系。由图可知，对应末端位置 P，机器人的手臂姿态有两种，一种是用实线表示的OEP，另一种是用虚线表示的 OE′P。为了区别这两种姿态，可以比照人类的手臂，把 OEP 称为**右手**(right)，把 OE′P 称为**左手**(left)。这样一来，就存在与末端位置相对应的多个关节角的组合，就不容易求解逆运动学。尽管如此，对于 3 轴水平多关节机器人，还是可以导出由机器人末端位置(x,y,z)求取关节角(θ_1,θ_2,Z)的公式。

右手

左手

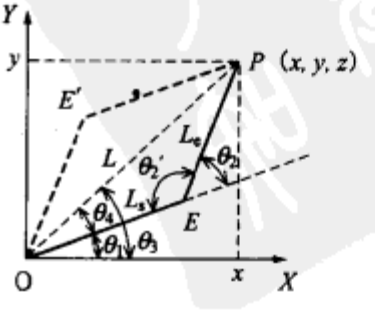


图 8.15　末端位置与关节角的关系

首先考虑关节角 θ_2。在$\triangle OEP$中，$\angle OEP=\theta_2'(=\pi-\theta_2)$，应用余弦定理，则

$$2\cdot OE\cdot EP\cdot\cos\theta_2'=OE^2+EP^2-OP^2$$

$$2\cdot L_3\cdot L_e\cdot\cos\theta_2'=L_3^2+L_e^2-(x^2+y^2)$$

所以

$$\cos\theta_2'=\frac{L_3^2+L_e^2-(x^2+y^2)}{2L_3L_e}$$

$$\theta_2'=\arccos\left(\frac{L_3^2+L_e^2-(x^2+y^2)}{2L_3L_e}\right) \tag{8.4}$$

$$\theta_2=\pi-\theta_2' \tag{8.5}$$

这里还必须考虑前面所述的右手和左手两组不同的解。由图 8.15 可知，右手时 $\theta_2\geqslant 0$，而左手时 $\theta_2<0$，因此用式(8.5)求得的 θ_2 的取值范围为 $0\leqslant\theta_2<\pi$，而左手的 θ_2 应为负值。

关于关节角 θ_1 可作如下考虑。由图 8.15 可知

$$\theta_1=\theta_3-\theta_4 \tag{8.6}$$

其中

$$\theta_3=\arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\theta_4=\arccos\left(\frac{L_3^2+(x^2+y^2)-L_e^2}{2L_3(x^2+y^2)}\right)$$

左手时，$\theta_1=\theta_3+\theta_4$。由于 Z 轴为直动轴，因此仍有 $z=Z$。

题外话

“网络机器人”即将到来

进入 2000 年以后，由于互连网的宽带(高速)连接迅速普及，使与互连网等信息网连接的网络机器人的研究开发速度加快。虽然现在已有实用化的网络机器人，如在外出时通过远距离操作机器人掌握自家情况等产品。但在今后，灾害救助、警备保安及收集信息等服务将由机器人提供，将会出现机器人服务业。

为实现这一目标，对机器人的远距离操作和信息传输等通信方法在生产厂之间必须制定统一的标准(见图 8.16)。只有通过标准化才能够向各种机器人提供信息服务，要促进服务业者的参与，就要从产业、政府和大专院校携手开始。

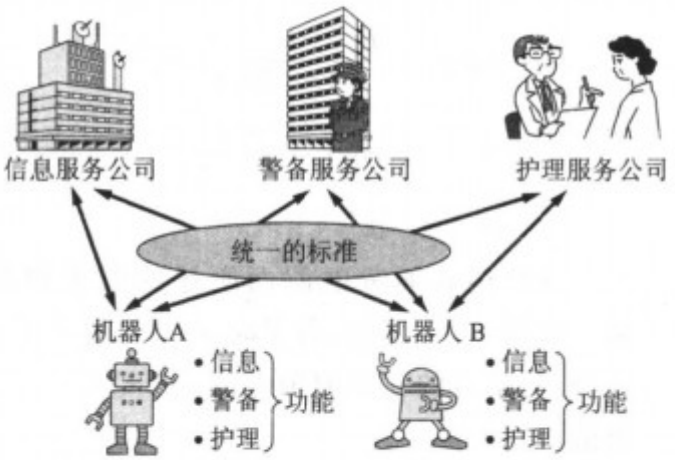


图 8.16　网络机器人的标准化

3　机器人的正运动分析

要　点

以 7 轴垂直多关节机器人(PA10-7C)的正运动学分析为例，说明使用 D-H 法的推导过程。本节将要求解的是从第 1 轴到第 3 轴的正运动。

解　释

机器人的各关节

图 8.17 所示为 7 轴垂直多关节机器人的外观形状，表 8.1 所示为该机器人的各关节的名称定义。右侧的 θ、d、α、a 为后面将要阐述的 **D-H 参数**。

D-H 参数

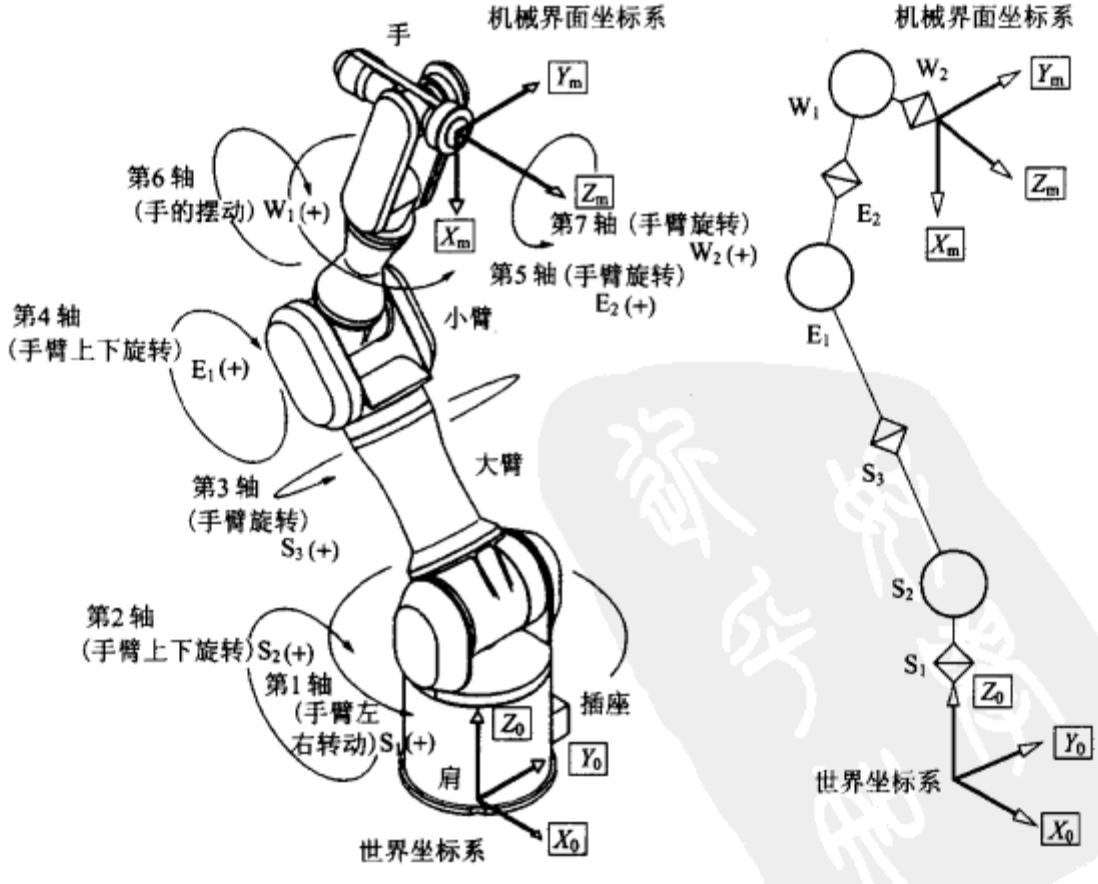


图 8.17　PA10-7C 外观与各轴名称

表 8.1　关节和 D-H 参数

关节序号	名　称	关节种类	θ	d	α	a
第 1 轴	S_1	腕的左右转动	θ_1	l_b	0	0
第 2 轴	S_2	腕的上下转动	θ_2	0	$-\pi/2$	0
第 3 轴	S_3	腕的旋转	θ_3	l_s	$+\pi/2$	0
第 4 轴	E_1	腕的上下转动	θ_4	0	$-\pi/2$	0
第 5 轴	E_2	腕的旋转	θ_5	l_e	$+\pi/2$	0
第 6 轴	W_1	手的摆动	θ_6	0	$-\pi/2$	0
第 7 轴	W_2	手的旋转	θ_7	l_w	$+\pi/2$	0

正运动学问题

由 PA10-7C 机器人的关节角度 $\boldsymbol{\theta}=[\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5,\theta_6,\theta_7]$能够求取机械界面的位置姿态 $\boldsymbol{X}=[x,y,z,\psi,\theta,\phi]$。但是，如果用第 8 章第 2 节阐述的作图法只能够求解简单的由 3 轴构成的机器人，求解 7 轴机器人就比较困难。求解如图 8.17 所示的多关节机器人的正运动学问题要使用 D-H 法。所谓 D-H 法是分别定义各轴的坐标系，仅着眼于 x 轴和 z 轴，是一种机械性地作成相邻轴的齐次变换矩阵解正运动学的分析方法。其求解过程如下。

对于初始的各关节按以下规则定义坐标系。

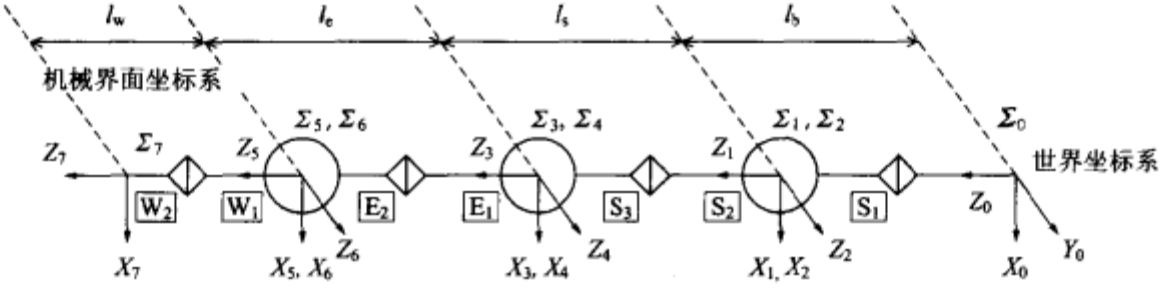
① 设置以旋转轴 $i(i=1\sim7)$为 Z 轴的坐标系$\sum_i$。

② x_i 轴同时垂直于 z_i 轴和 z_{i+1} 轴，其方向从 z_i 轴指向 z_{i+1} 轴。另外，当旋转轴 i 通过$\sum_{i+1}$的原点时，将$\sum_{i+1}$的原点与$\sum_i$的原点重合，可以减少计算量(图 8.18 中的$\sum_1$与$\sum_2$相同)。

③ 轴的旋转方向取顺时针方向旋转为正。

PA10-7C 的坐标系如图 8.18 所示。使用该坐标系，能够将相邻坐标系的关系用以下四个 D-H 参数表示，它们相当于表 8.1 右侧的 θ、d、α、a。

- θ_i 为绕 z_i 轴旋转的从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴的角度。
- d_i 为在 z_i 轴正方向测得的从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴的距离。
- α_i 为绕 x_{i-1} 轴旋转的从 z_{i-1} 轴到 z_i 轴的角度。
- a_i 为在 x_{i-1} 轴正方向测得的从 z_{i-1} 轴到 z_i 轴的距离。



注：与机械界面坐标系原点相同的位置姿态设置 7 轴坐标系能够减少计算量。

图 8.18 定义 PA10-7C 的坐标系

($\theta_1=\theta_2=\theta_3=\theta_4=\theta_5=\theta_6=\theta_7=0°$的姿态)

因此得到由坐标系$\sum_{i-1}$变换到$\sum_i$的变换矩阵${}^{i-1}\boldsymbol{T}_i$如下：

$$
\begin{aligned}
{}^{i-1}\boldsymbol{T}_i &= \mathrm{Trans}(a_i,0,0)\mathrm{Rot}(x_{i-1},a_i)\mathrm{Trans}(0,0,d_i)\\
&\quad \mathrm{Rot}(z_{i-1},\theta_i)\\
&= \begin{bmatrix}1&0&0&a_i\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&C\alpha_i&-S\alpha_i&0\\0&S\alpha_i&C\alpha_i&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\\
&\quad \begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&d_i\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C\theta_i&-S\theta_i&0&0\\S\theta_i&C\theta_i&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\\
&= \begin{bmatrix}\boldsymbol{n}&\boldsymbol{o}&\boldsymbol{a}&\boldsymbol{p}\\C\theta_i&-S\theta_i&0&a_i\\C\alpha_iS\theta_i&C\alpha_iC\theta_i&-S\alpha_i&-d_iS\alpha_i\\S\alpha_iS\theta_i&S\alpha_iC\theta_i&C\alpha_i&d_iC\alpha_i\\0&0&0&1\end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{8.7}
$$

其中，$C\theta_i=\cos\theta_i$，$S\theta_i=\sin\theta_i$。

齐次变换矩阵

将式(8.7)的矩阵叫做**齐次变换矩阵**，左上 3 行×3 列是将表示姿态的 3 要素(ψ,θ,ϕ)用 9 个变量表示的旋转矩阵，右上 3 行×1 列是表示变换前坐标原点的位置向量(x，y，z)。该矩阵的各要素为

$\boldsymbol{n}=[C\theta_i \quad C\alpha_iS\theta_i \quad S\alpha_iS\theta_i]^{\mathrm{T}}$：在坐标系$\sum_{i-1}$中表示$x_i$的单位向量。

$\boldsymbol{o}=[-S\theta_i \quad C\alpha_i C\theta_i \quad S\alpha_i C\theta_i]^{\mathrm{T}}$：在坐标系$\sum_{i-1}$中表示$y_i$的单位向量。

$\boldsymbol{a}=[0 \quad -S\alpha_i \quad C\alpha_i]^{\mathrm{T}}$：在坐标系$\sum_{i-1}$中表示$z_i$的单位向量。

$\boldsymbol{p}=[a_i \quad -d_i S\alpha_i \quad dC\alpha_i]^{\mathrm{T}}$：在坐标系$\sum_{i-1}$中表示$\sum_i$原点位置的单位向量。

将通过以上过程求出的齐次变换矩阵组合，根据以下的矩阵运算，求出从基础坐标$\sum_0$到机械界面坐标$\sum_7$的齐次变换矩阵${}^0\boldsymbol{T}_7$。

$$
\begin{aligned}
&{}^0\boldsymbol{T}_7(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5,\theta_6,\theta_7)\\
&={}^0\boldsymbol{T}_1\,{}^1\boldsymbol{T}_2\,{}^2\boldsymbol{T}_3\,{}^3\boldsymbol{T}_4\,{}^4\boldsymbol{T}_5\,{}^5\boldsymbol{T}_6\,{}^6\boldsymbol{T}_7\\
&=\begin{bmatrix} {}^0\boldsymbol{R}_7 & \vdots & {}^0\boldsymbol{p}_7 \\ \cdots\cdots & \vdots & \cdots\cdots \\ \boldsymbol{0}_{1\times 3} & \vdots & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}
$$

如前所述，由齐次变换矩阵得到变换前的坐标原点位置向量${}^0\boldsymbol{p}_7=[x \quad y \quad z]^{\mathrm{T}}$和旋转矩阵${}^0\boldsymbol{R}\in\boldsymbol{R}^{3\times 3}$。进而能够由旋转矩阵计算出欧拉角等姿态要素$(\psi,\theta,\phi)$。通过以上过程，由关节角度$\theta$求机械界面的位置姿态$\boldsymbol{X}$是解正运动学问题。但是，推导过程是包含关节角度$\theta$变量的复杂式子，用MAPLE等计算工具求解较好。

推导实例

试实际求解PA10-7C的齐次变换矩阵。为了简单地说明问题，在此只求解第S_1轴到S_3轴。根据如前所述的齐次变换矩阵的定义和表8.1，求出开始时相邻轴之间的齐次变换矩阵。

$$
{}^0\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
{}^1\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_2 & -C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$^{2}\boldsymbol{T}_{3}=\begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & l_s \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将这些齐次变换矩阵相互组合，求出从世界坐标系$\sum_0$到3轴坐标原点$\sum_3$的齐次变换矩阵$^{0}\boldsymbol{T}_{3}$。

$$^{0}\boldsymbol{T}_{3}=\begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_2 & -C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & l_s \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C\theta_2C\theta_3 & -C\theta_2S\theta_3 & S\theta_2 & S\theta_2l_s \\ S\theta_1 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ -S\theta_2C\theta_3 & S\theta_2S\theta_3 & C\theta_2 & -C\theta_2\cdot l_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} C\theta_1C\theta_2C\theta_3-S\theta_1S\theta_3 & -C\theta_1C\theta_2C\theta_3-S\theta_1S\theta_3 & C\theta_1S\theta_2 & C\theta_1S\theta_2\cdot l_s \\ S\theta_1C\theta_2C\theta_3+C\theta_1S\theta_3 & -S\theta_1C\theta_2C\theta_3+C\theta_1S\theta_3 & S\theta_1C\theta_2 & S\theta_1S\theta_2\cdot l_s \\ -S\theta_2C\theta_3 & S\theta_2S\theta_3 & C\theta_2 & C\theta_2\cdot l_s+l_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.8}$$

为了验证所得到的齐次变换矩阵的正确性，将它与图8.18所示的齐次变换矩阵相比较，证明是否一致。如图8.18所示的状态，如果$\theta_1=\theta_2=\theta_3=0$，式(8.8)的齐次变换矩阵如下：

$$^{0}\boldsymbol{T}_{3}=\begin{array}{c}\begin{matrix} \boldsymbol{n} & \boldsymbol{o} & \boldsymbol{a} & \boldsymbol{p} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_s+l_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\end{array}$$

根据这个矩阵可知，因为$\boldsymbol{n}$的$\mathbf{X}_3$向量与$\boldsymbol{X}_0$向量一致，$\boldsymbol{o}$的$\boldsymbol{Y}_3$向量与$\boldsymbol{Y}_0$向量一致，$\boldsymbol{a}$的$\boldsymbol{Z}_3$向量与$\boldsymbol{Z}_0$向量一致，所以，$\sum_0$与$\sum_3$的坐标方向一致，并且$\sum_3$的原点位置在$\sum_0$的$\boldsymbol{Z}$方向上l_s+l_b处。另一方面，根据图8.18可知，$\sum_0$与$\sum_3$的坐标方向一致，并且$\sum_3$的原点位置也与齐次变换矩阵的结

果一致，因此可以确定该齐次变换矩阵与图 8.18 是一致的，并且都是正确的。

相关知识

◆ 姿态的表现方法

在姿态要素(ψ,θ,ϕ)的表现形式中，有多种表示方法。以下将要说明的是典型的欧拉角和倾斜・俯仰・偏转角。

欧拉角　欧拉角表示的几何学意义如图 8.19 所示。图中的 X_0、Y_0、Z_0 坐标轴为姿态表现基准的坐标系，如基准坐标系。用坐标轴 X_t、Y_t、Z_t 表示的坐标系是机械界面坐标系。所谓姿态表示，就是无论基准坐标系按怎样的顺序转换，都应表现为与机械界面坐标系相一致。另外，坐标系的转换是指坐标系绕自身的某个轴所作的旋转。

按以下顺序使图 8.19 中的 X_0、Y_0、Z_0 轴与 X_t、Y_t、Z_t 轴表示的姿态一致。

① 将基准坐标系绕 Z_0 轴旋转 ϕ，X_0 轴在 X_0-Y_0 平面上移动(X_0 轴、Y_0 轴绕 Z_0 轴旋转 ϕ)。旋转后的坐标轴为 X_1、Y_1、Z_1。

② 将旋转后的坐标系再绕 Y_1 轴旋转 θ，使 Z_1 轴与 Z_t 轴的方向一致。旋转后的坐标轴为 X_2、Y_2、Z_2。

③ 在这种状态下，只有 Z_2 轴与 Z_t 轴一致，X_2 轴和 Y_2 轴与 X_t 轴和 Y_t 轴不一致。因此，再绕 Z_2 轴旋转 ϕ，使 X_2 轴与 X_t 轴、Y_2 轴与 Y_t 轴相一致。这时的 X_0、Y_0、Z_0 轴与 X_t、Y_t、Z_t 轴的所有坐标轴完全一致。

这样，使基准坐标系先绕 Z_0 轴旋转 ϕ，再绕旋转后的新坐标系的 Y_1 轴旋转 θ，最后绕前一次旋转后的新坐标系的 Z_2 轴旋转 ψ，得到所要求姿态的方法叫欧拉角表示。用欧拉角的旋转矩阵为

$$ {}^{0}\boldsymbol{R}_t = \begin{bmatrix} C\phi C\theta C\psi - S\phi S\psi & -C\phi C\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta \\ S\phi C\theta C\psi + C\phi S\psi & -S\phi C\theta C\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta \\ -S\theta C\psi & S\theta S\psi & C\theta \end{bmatrix} \tag{8.9} $$

(其中 $S\phi=\sin\phi$，$C\phi=\cos\phi$。θ 和 ψ 也是如此)

如果给出旋转矩阵 ${}^{0}\boldsymbol{R}_t$ 的数值，就可以由式(8.9)的 9 个要素构成 9 次联立方程，求出欧拉角的 3 要素(ψ,θ,ϕ)。

倾斜・俯仰・偏转角　与欧拉角相同，也是表示姿态的方法。这种方法首先绕 X_0 轴转过偏转角(ψ)，再绕 Y_0 轴转过俯仰角(θ)，最后绕 Z_0 轴转过倾斜角(ϕ)得到所要求的姿态。与欧拉角的不同之处是分别绕初始的坐标轴 X_0、

Y_0、Z_0旋转。用倾斜·俯仰·偏转角的旋转矩阵为

$$ {}^{0}\boldsymbol{R}_{t}=\begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi-S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi-S\phi S\psi \\ S\phi S\theta & S\phi S\theta S\psi+C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi-C\phi C\psi \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix} \tag{8.10} $$

（其中 $S\phi=\sin\phi$，$C\phi=\cos\phi$。θ 和 ψ 也是如此）

与欧拉角的相同之处是，如果给出旋转矩阵${}^{0}\boldsymbol{R}$的数值，就可以由式(8.10)的9个要素构成9次联立方程，求出欧拉角的3要素(ψ,θ,ϕ)。

PA10系列采用的是倾斜·俯仰·偏转角的方法。

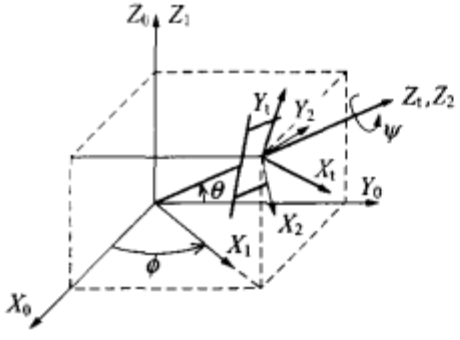


图 8.19　姿态的表示方法(欧拉角)

4　机器人的逆运动分析

要　点

正运动学若按固定的程序计算比较容易得到解，而逆运动学一般没有固定的程序，并且根据机器人的构造不同，有时也存在无法求解的情况。逆运动学分析不仅有解析的方法，还有数值计算的方法。本节将以7轴垂直多关节机器人(PA10-7C)为例，介绍逆运动学的推导程序。

解　释

机器人的各关节

机器人各关节要素与第8章第3节的图8.17、表8.1中定义的相同。

逆运动学问题

所谓逆运动学问题就是与正运动学相反，由机械界面的位置姿态X求关节角度θ。如果不求解逆运动学问题，用户即使制作完成机械界面(机器人的末端)的目标轨迹，由于求不出实际用电机驱动机器人的轨迹，机器人还是不能动。

求解逆运动学问题有解析和数值计算两种方法。

解析的方法

解析的方法如第8章第2节中的图8.15所示，是由机器人的几何图推导出代数式的求解方法。但是根据机器人的构造不同，有时也存在无法求解的情况。由于很难事先判断是否可解，所以必须动手做了以后才能知道结果。但是也有例外，6轴机器人如果是手指3个关节的3个轴交于一点的结构，就能够很容易地求解。因此，6轴的工业机器人几乎都是这种结构。

如第8章第2节中的图8.15所示，解析方法常有多个解。因此，在用由正交坐标给出的机器人手指的目标轨迹求关节角轨迹时，需要分成不同的方法，如自动选择离目前关节角度近的轨迹、用户选择正轨迹等。

数值计算的方法

求解机器人的关节角度 $\boldsymbol{\theta}=[\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_n]^{\mathrm{T}} \in \boldsymbol{R}^n$ 和机械界面位置姿态 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\theta})=[f_1 \quad f_2 \quad \cdots \quad f_m]^{\mathrm{T}} \in \boldsymbol{R}^m$ 的关系式

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\theta}) \tag{8.11}$$

与第 8.3 节的机械界面的 $\boldsymbol{X}$ 相同，设 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\theta})$ 为 $[x,y,z,\psi,\theta,\phi]$。根据第 8.3 节的齐次变换矩阵，由位置 (x,y,z) 和旋转矩阵求解。如果是求其反函数就是求解逆运动学。但是，由于 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\theta})$ 是非线性函数，所以不能够用解析的方法求解。要按以下的程序进行数值计算。

先将式(8.11)用时间微分

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}}{\partial t}=\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}}\frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial t} \tag{8.12}$$

再将其离散变换

$$\begin{aligned}\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{X}[i+1]-\boldsymbol{X}[i])&=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial f_1}{\partial \theta_1}\dfrac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \dfrac{\partial f_1}{\partial \theta_n}\\ \cdots\cdots & & \\ \dfrac{\partial f_m}{\partial \theta_1}\dfrac{\partial f_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \dfrac{\partial f_m}{\partial \theta_n}\end{bmatrix}\\ &\quad\times\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{\theta}[i+1]-\boldsymbol{\theta}[i])\\ &=\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{\theta}[i+1]-\boldsymbol{\theta}[i])\end{aligned} \tag{8.13}$$

雅可比矩阵

其中，$\boldsymbol{J}$ 被称为**雅可比矩阵**。若 $\boldsymbol{J}$ 正则，则 $\boldsymbol{J}$ 的逆阵为

$$\begin{aligned}\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{\theta}[i+1]-\boldsymbol{\theta}[i])=\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{X}[i+1]\\ -\boldsymbol{X}[i])\end{aligned} \tag{8.14}$$

右边的雅可比矩阵是非常复杂的，不能够用解析的方法求出其逆矩阵，但可以用数值的方法计算。

另外，右边的 $\boldsymbol{X}[i]$ 由 $\boldsymbol{X}[i]=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\theta}[i])$ 求解，可用数值的方法进行计算。在此，取两边的和为 $0\sim k$。

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=0}^{k}\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{\theta}[i+1]-\boldsymbol{\theta}[i])=\sum_{i=0}^{k}\left\{\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}\right.\\
&\qquad\left.\times(\boldsymbol{X}[i+1]-\boldsymbol{X}[i])\right\}\\
&\frac{1}{\Delta t}\left\{(\boldsymbol{\theta}[\mathrm{k}+1]-\boldsymbol{\theta}[k])+(\boldsymbol{\theta}[k]-\boldsymbol{\theta}[k-1])+\right.\\
&\quad\left.\cdots+(\boldsymbol{\theta}[1]-\boldsymbol{\theta}[0])\right\}\\
&=\sum_{i=0}^{k}\left\{\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{X}[i+1]-\boldsymbol{X}[i])\right\}\\
&\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{\theta}[k+1]-\boldsymbol{\theta}[0])=\sum_{i=0}^{k}\left\{\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}\right.\\
&\qquad\left.\times(\boldsymbol{X}[i+1]-\boldsymbol{X}[i])\right\}\\
&\boldsymbol{\theta}[k+1]=\Delta t\sum_{i=0}^{k}\left\{\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{X}[i+1]\right.\\
&\qquad\left.-\boldsymbol{X}[i])\right\}+\boldsymbol{\theta}[0]
\end{aligned}\right\}$$

能进行数值计算　　(8.15)

这样，可由机械界面的位置姿态 $\boldsymbol{X}$ 求出关节角 $\boldsymbol{\theta}$，故逆运动学问题可解。

再将式(8.15)变形如下：

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\theta}[k+1]&=\Delta t\sum_{i=0}^{k}\left\{\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{X}[i+1]-\boldsymbol{X}[i])\right\}\\
&\quad+\boldsymbol{\theta}[0]\\
&=\Delta t\sum_{i=0}^{k-1}\left\{\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[i])\frac{1}{\Delta t}(\boldsymbol{X}[i+1]-\boldsymbol{X}[i])\right\}\\
&\quad+\boldsymbol{\theta}[0]+\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[k])(\boldsymbol{X}[k+1]-\boldsymbol{X}[k])\\
&=\boldsymbol{\theta}[k]+\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}[k])(\boldsymbol{X}[k+1]-\boldsymbol{X}[k])
\end{aligned}\tag{8.16}$$

由式(8.16)可知，求解逆运动学问题时，如果能够得到1个脉冲之前的关节角 $\boldsymbol{\theta}[k]$ 及位置姿态 $\boldsymbol{X}[k]$，就可以很容易地求出 $\boldsymbol{\theta}[k+1]$。

例如，使用这一结果，由直角坐标给出的机器人手指的目标轨迹，求取关节角轨迹。只要将式(8.16)右边最新位

置的 $\boldsymbol{X}[k+1]$替换为 $\boldsymbol{X}_t[k+1]$，左边的 $\boldsymbol{\theta}[k+1]$替换为关节角轨迹 $\boldsymbol{\theta}_t[k+1]$即可。

$$\boldsymbol{\theta}_t[k+1]=\boldsymbol{\theta}[k]+\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}_t[k])(\boldsymbol{X}_t[k+1]-\boldsymbol{X}[k]) \times \boldsymbol{X}[k]=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\theta}[k]) \tag{8.17}$$

数值计算方法的特点是不存在多个解，对于一般的机器人都能求出解。但也存在下面的问题。

① 计算量大。

特异点

② 当雅可比矩阵非正则时（机器人的手指存在**特异点**时），由于不能够进行逆矩阵运算而得不到解。

相关知识

◆ 特异点

当机器人的手指通过被称为特异点的位置姿态附近时，为了维持手指的轨迹和速度，必须急剧增大多个关节的速度。由于生成的速度指令超出电机的额定速度，导致不能够进行控制，这种情况发生在如上所述的雅可比矩阵非正则时。对于 6 自由度机器人，通常是大致确定特异点，如肩特异点、肘特异点和手特异点。

PA-10 系列使用定制的 SC(Singularity Consistent)法，保证能够在特异点附近安全地动作。

5　机器人的驱动方式与控制

要　点

机器人的驱动方式一般采用电动机的电气式伺服系统。机器人伺服系统的特征为由每个电机构成独立的控制回路，而机器人是一整体又需统一进行动作，进行以正、逆运动分析为基础的计算机控制。

本节将以7轴垂直多关节机器人(PA10-7C)为例，介绍其驱动方式和控制实例。

解　释

伺服机构

所谓伺服机构，是指以位置、速度或加速度等物理量作为被控量，追踪任意变化的目标值的一种控制系统。**闭环反馈系统**的伺服机构，是由测定位置等的传感器、以该测定量来调整操作量的控制器、电机和液压机构等执行机构构成。如果不使用测定位置的传感器，而是用步进电机进行位置控制的则是**开环控制**。

闭环反馈系统

开环控制

机器人的驱动控制就是以闭环反馈系统的伺服机构为基础，控制对象是电气式、液压式和气动式执行装置。从机器人的易保养性、经济性和小型化等方面来考虑，目前机器人大多采用电气式驱动装置，其中AC伺服电机使用最多。

伺服机构的方框图

图8.20所示为一个典型的伺服机构的方框图。这里以电机的旋转角度(位置)作为最终的被控量。为了提高系统的稳定性和快速响应性，除了位置环节之外，系统还设置了速度负反馈和电流负反馈两个闭环。

滤波部分

① **滤波部分**：细分上位指令值，通过滤波使指令曲线成为与负载对应的平滑变化的指令。一般情况下，滤波部分采用二阶延迟环节。

位置控制器

② **位置控制器**：以滤波环节输出的位置指令值与位置检测器发送的位置反馈信号为基础来进行位置控制。在运算方式上采用PID(比例＋时间积分＋时间微分)方式。(下面的③和④也采用同样的方式)。

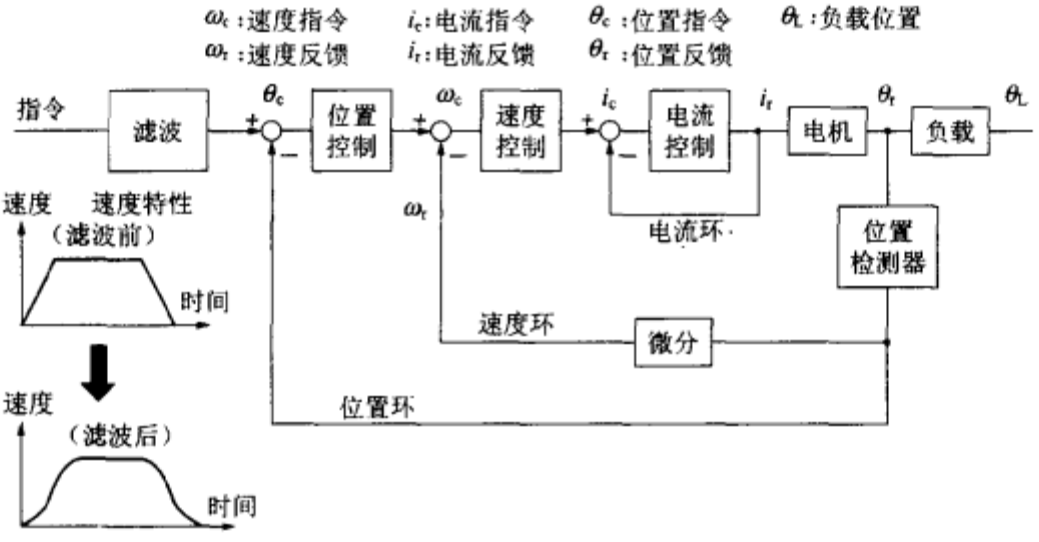


图 8.20　伺服机构的方框图

速度控制器

③ **速度控制器**：以位置控制器发送的速度指令值与位置检测器发送并对时间微分后的速度信号为基础进行速度控制。

电流控制器

④ **电流控制器**：以速度控制器发送的电流指令值与电机电流的反馈信号为基础进行电流控制。

伺服机构实例

图 8.21 和图 8.22 是通用机器人 PA10-7C 伺服机构的概念图。由运动控制部分和伺服驱动部分构成软件伺服。

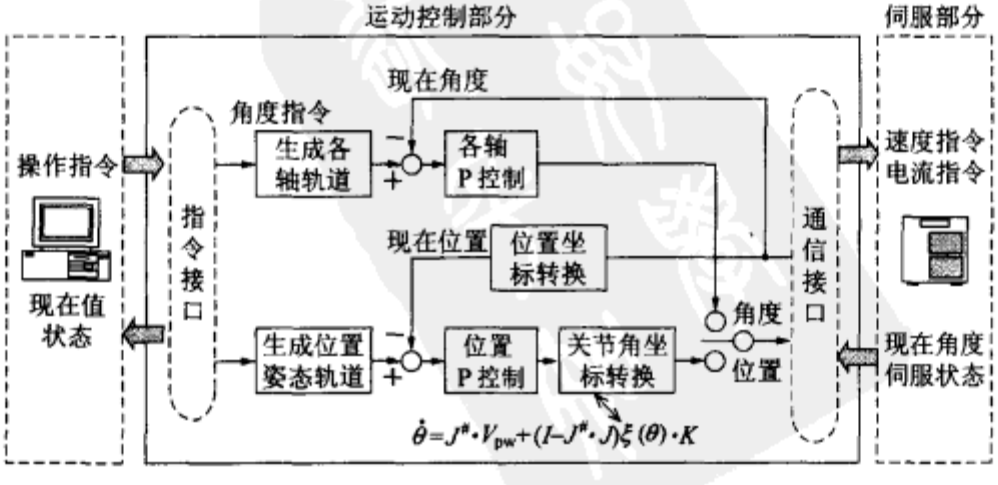


图 8.21　伺服机构的概念（运动控制部分）

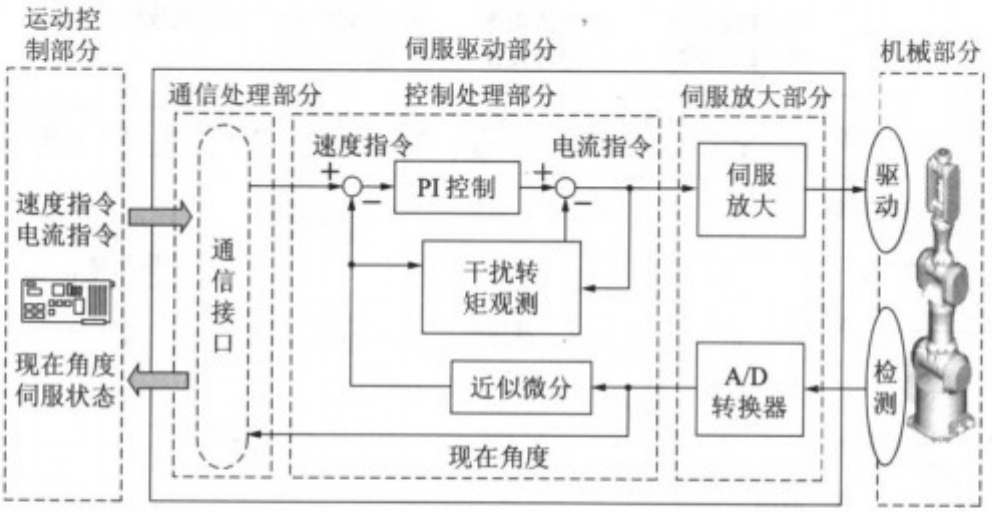


图 8.22　伺服机构的概念(伺服驱动部分)

运动控制部分

运动控制部分的计算处理通过安装了实时 OS 的运动控制 CPU(32 bit),每 2 ms 进行一次。

·接收上位控制器发送的位置指令,生成位置姿态的轨迹。

·接收伺服驱动部分发送的角度信息,构成位置控制回路。

·进行逆运动学等计算,生成各轴的速度指令值。

伺服驱动部分

伺服驱动部分是由与运动控制部分的通信处理部分、对每个轴的速度及电流回路进行运算处理的控制处理部分、供给各电机电流的伺服放大部分构成。

通信处理部分

通信处理部分统一由一个 CPU(32 bit)进行处理。将接收到的运动控制部分的指令分配给伺服 CPU,由伺服 CPU 将信息(角度和状态等)发送给运动控制部分。另外,还要保证各伺服 CPU 处理的同步。

控制处理部分

控制处理部分由 7 个伺服 CPU(32 bit)进行处理。接受主 CPU 的指令,进行各轴的速度及电流控制。在速度控制时,为提高控制性能和降低振动插入相位超前或滞后而追加了 PID 控制。此外,还要实时监控运算结果和反馈信号,发生异常状况时及时报警,以保护系统。

伺服放大部分

IPM

伺服放大部分通常由 PWM 信号发生器和开关用功率放大元件构成,但 PA10-7C 使用 **IPM**(Intelligent Power Module)。IPM 增加了开关用功率放大元件,将驱动电路和

保护电路等制作成一个模块，使 IPM 实现了放热效率高、控制电路简单化和小型化。

机械部分

机械部分由驱动部分（电机和减速器）、位置检测部分（编码器）构成。

驱动部分

驱动部分要产生驱动机器人的力矩，所以电机大多都采用 DC 伺服电机或 AC 伺服电机（PA10-7C 使用 AC 伺服电机）。由于 DC 伺服电机必须进行整流子（电刷）的交换操作，因此从维护方面考虑应采用 AC 伺服电机。

机器人用的电机应满足下面的条件。

① 能够承受加、减速时频繁的瞬时负载（是额定负载的 3～4 倍）。

② 电机的惯性要小，具有快速响应特性。

③ 力矩脉动和摩擦阻抗要小，以提高电机效率。

④ 小型化、轻量化和高输出。

⑤ 具有足够长的使用寿命。

位置检测部分

位置检测部分通常使用编码器检测电机的旋转角度，生成反馈信号。编码器可分为输出相对旋转量的增量型和输出绝对旋转量的绝对型。前者在每次接通电源时，必须进行机械系统的原点设定操作。后者安装了旋转量的记忆电路，不需要进行原点设定操作。对于 PA10-7C，考虑到需要搬运使用，所以没有使用普通的编码器，而是采用了抗冲击性能好的旋转变压器。旋转变压器的基本构造与电机相同，是一种环境适应性能（振动、温度和噪声等）好的角度检测器。

相关知识

◆ 软件伺服

由计算机构成的伺服系统中，除功率部分以外全部实现了软件化处理，不再需要昂贵的 D/A 转换器和模拟比较电路，可以大幅度地削减部件的数量和调试工作量。同时，可以很容易地通过调整参数来改变系统的控制特性，能够实现高性能控制。

◆ **PWM 发生器**

产生供开关用功率元件使用的脉冲宽度调制(PWM:Pulse Width Modulation)信号。当这种 PWM 频率在声频区域时,电机运行产生的载波声是令人不适的噪声,所以,通常需要将 PWM 频率设定在声频以上。

◆ **开关用功率元件**

由 PWM 信号驱动电机工作的是大功率开关。以前多采用大功率晶体管作为开关用功率元件,但近几年来,因 PWM 信号的高频化和驱动电路的简化,一般使用功率 MOSFET 和 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)功率元件。

6 机器人的操作

要 点

机器人操作的最终目的是使机器人能够按照既定的动作进行。无论是机器人的示教操作，还是程序设计，都是将人类头脑中设想的动作传授给机器人的一种手段。可以说示教操作和程序设计开启了人类利用机器人的窗口。

本节将以7轴垂直多关节机器人(PA10-7C)为例，说明其操作过程。

解 释

系统的基本构成

图8.23所示为通用机器人PA10-7C的基本构成。

PA10-7C采用如图8.23所示的分级结构。各级之间的界面是开放的，能够构建柔性系统。

第1级：机械部分 由执行装置(电机和减速器)、位置检测器(旋转变压器)、关断电源时保持机器人位置的制动器、固定元器件并保证机械刚性的机架等机械要素构成。

第2级：伺服驱动部分 对机器人的各轴进行控制，是一体型的控制器。

第3级：运动控制部分 进行机器人的逆运动学等运算，由手指的位置姿态变换为各轴的数值坐标。

第4级：操作控制应用程序部分 用于进行机器人操作的用户接口和示教数据的处理。同时，提取传感器的数值，生成使机器人半自律动作的用户应用程序等，并在计算机上模拟机器人的动作。

第1～3级使用标准的系统，第4级可根据用户接口或动作用途的不同，能够改变每个用途的基本使用方法。如果需要，在第3级的任务中也能够安装第4级的计算机。

由于PA10-7C是由计算机向机器人发送指令的系统，所以必须配备计算机。

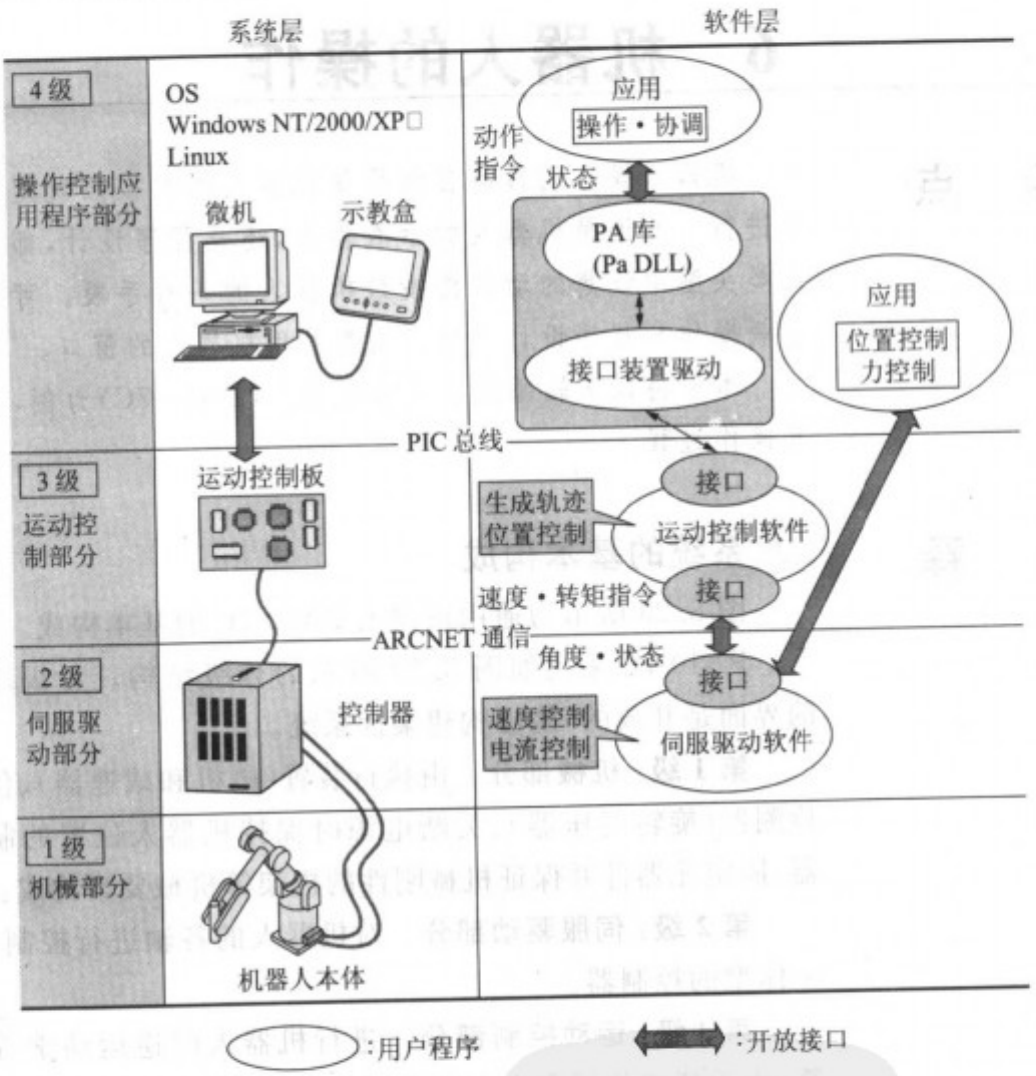


图 8.23　PA10-7C 的基本构成

操作的种类

PA10-7C 的操作有三种，即通过计算机上的用户接口的操作、通过示教盒的操作和通过动作应用程序的操作。

通过计算机上用户接口的操作　这是在计算机窗口的用户界面上单击机器人的功能按钮来进行机器人操作的方法。除了机器人的操作指令以外，还能够生成示教数据和进行编辑。

通过示教盒的操作　这是使用示教盒进行机器人操作的方法。通常是进行示教数据的微调整等在机器人附近作业时使用示教盒。示教盒上安装了自动停止开关，以保证在机器人附近的作业安全。

PA 程序库

通过动作应用程序的操作 通过使用 PA 程序库(后文中将介绍)生成的程序进行操作。由于是进行实时图像处理,以此生成实时控制机器人动作的指令等,并使用自由度高的高级语言,所以能够进行以前用示教再现难以实现的动作。

动作模式

PA10-7C 的典型动作模式有以下四种。通过使用操作器切换动作模式,能够使动作基本符合操作者的意图。

各轴角度的控制 用于给出各轴的目标角度和动作方式。在目标姿态已经确定时,或只做特定轴动作时使用。

末端位置姿态的控制(RMRC 控制) 这是相对于定义的坐标轴给出机器人末端的位置偏差和姿态偏差进行动作的方法。在使机器人末端做直线移动或姿态变化时使用。

如第 8.4 节所述,由机器人末端的位置姿态推导出各关节轴运动量(逆运动学)的数值计算法,以使机器人末端作直线移动或姿态变化。

PA10-7C 的末端位置姿态的控制叫做 RMRC 控制。

冗余轴的控制 对于 PA10-7C 这种 7 轴机器人,存在多个相同的末端位置姿态的各轴数值。将具有这种特点的机器人称为"有**冗余轴**的机器人"。

冗余轴

通过控制冗余轴能够做复杂的动作。例如,当有障碍物影响肘部运动时,不需要改变末端的位置姿态,只要改变肘部的位置,就能够避开障碍物。

PA10-7C 采用函数评价的控制方法来将各轴数值的多个解收敛为一个。对各轴进行二次评价函数的加权,通过转换评价函数,调整冗余轴的动作。

控制冗余轴有以下两种方法。

- 在改变机器人末端的位置姿态的同时限制冗余轴的控制。
- 不改变机器人末端的位置姿态,只使冗余轴(肘部)的位置发生变化的控制(见图 8.24)。

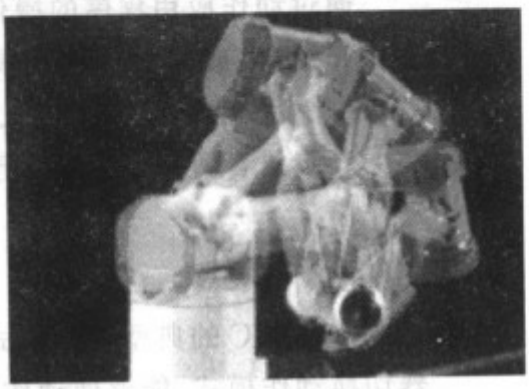


图 8.24　冗余轴控制

再现控制　通过获得的示教数据进行动作的方法。按照用示教数据设定的操作程序动作。根据数字 I/O 输入的外部信号进行控制操作等。

动作模式

PA 程序库

PA10-7C 使用的是中间语言，能够在被称为 **PA 程序库**的上级应用程序和运动控制部分之间沟通，能够通过 Visual C++和 Visual BASIC 等高级语言编程。PA 程序库是由用 C 语言生成的 DLL(定时连接程序库)的形式构成，由应用程序向机器人提供统一的存取方式(命令)。

资源的应用　因为 PA 程序库是基于 Windows 及 Linux 的 DLL，所以能够有效地利用 Windows 及 Linux 的资源。例如，由于能够利用软件的开发环境及其驱动、声音识别和图像处理等程序库资源，因此构建高级系统比较容易。另外，还能够直接使用操作手柄、LAN 及外存储器等计算机的外围设备。

机器人也是一个设备　在进行软件开发时，机器人也与其他的传感器或图像处理装置等相同，只是计算机上的一个设备，在网络上可用一个笔记本电脑操作，非常方便。使用 PA 程序库就能够将机器人作为一个设备操作。图 8.25 所示为将机器人作为一个设备操作的程序概要。

```
<C 语言>
pa_ini_sys(     );     //PA(程序库初始化)
pa_opn_arm(ARM0);      //No.1
pa_sta_arm(ARM0);      //控制开始
    :
if(图像处理...){
pa_exe_axs(ARM0,WM_NOWAIT);//各轴动作
pa_mov_XYZ(ARM0,100.0,0.0,0.0,WM_WAIT);
}else{
其他装置(如移动转向架的控制)...
}
    :
pa_ext_arm(ARM0);      //控制停止
pa_cls_arm(ARM0);      //No.1
pa_ter_sys(     );     //PA 程序库结束
```

图 8.25 程序概要

相关知识

◆ 自动停止开关

自动停止开关是安装在示教盒等上的开关，是当使用示教盒的操作者发现危险时能够迅速停止机器人的开关。以前比较流行 2 位开关，现在使用较多的是根据国际安全标准设计的 3 位开关，安全性能更高。

3 位自动停止开关只有在继续保持按压到的规定位置时，才允许机器人动作。放开开关或继续压下开关时，机器人停止动作。

◆ 示 教

示教是指在现场教机器人作业的程序、作业的姿态、进行作业的位置等。示教不仅是给机器人动作的数据，同时也要教机器人工作时的动作(控制等)。

题外话

离线程序设计与模拟装置

机器人的程序设计包含在示教作业中，在计算机上进行的离线程序设计已经开始使用。

机器人的示教作业是使用实机进行的，使用实机的示教作业，因机器人自身必须动作，所以是一种需要花费人力和时间的作业。要进行高水平的示教，就要求机器人操作者的技术水平也要高。另外，在现场进行示教作业

时，要停止生产，这便带来了工作效率降低的问题。

离线程序设计需要事先准备作业环境的配置数据及工作 CAD 的数据。如果能够与模拟功能组合，就能够事先在显示器上确认机器人的动作，缩短停止生产线工作的时间，并且，机器人的程序设计还不必要求机器人操作者具有较高的技术。

当将确认的数据传送到现场的实机上以后，理想模式与实机存在机械偏差，因此，需要使用各种传感器进行位置的矫正（矫正方法参见第 8.8 节）。

7 机器人的接口

要点

在机器人上要安装各种接口，以便机器人与控制器、控制器与各外围设备、控制器与用户之间进行互动。为了有效地使用机器人，必须准确理解这些接口电路。

本节将以7轴垂直多关节机器人PA10-7C的接口为例加以说明。

解释

机器人的接口

接口通常定义为“在两者之间建立的信息交换的中介，并且是标准化的”。不仅是机器人，其他设备也都相同，可将接口分为下面的三大类别。

硬件接口 硬件接口是根据在相互连接的多个装置间进行通信时的约定来规定接头的形状和电信号形式等。用于计算机内部的数据传输、计算机与外部设备的数据传输、计算机间的通信等，为满足各种用途，接口的种类也有许多。

软件接口 软件接口是规定的在程序之间交换数据的顺序和形式。特别将从外部呼出OS和组件（部件化的软件）功能时的约定叫做**API**（Application Program Interface）。广义上的软件接口包括文件形式等，但通常是指API。

API

用户接口 用户接口是规定的计算机对用户输出信息的形式，反之是规定的用户输入信息的方式。虽然传统的以文字为基础的方法能够长期使用，但由于计算机性能的提高和普及，使用图标或鼠标操作等的图形化的用户接口已经被广泛采用。用户接口也称为**人机接口**。

人机接口

硬件接口

硬件接口适用于机器人和控制器、控制器与运动控制口的连接等机器间的机械连接。连接之前先要确定机器之间的插头，为了避免连接错误，使用者要确认插头的编号和形状。

在使用者准备连接机器和机器人时，还必须要了解除硬件以外的其他数据操作顺序的协议。当然，硬件接口也

是协议的要件之一(也可以认为所有的接口都是协议的要件之一)。

例如,在第8.6节所述的第2层和第3层之间是通过被称为**ARCNET**的实时串联网络连接。ARCNET的传输媒介是双绞线,接头使用RJ11,其管脚分配如表8.2所示。电气特性为**RS-485**型。

ARCNET

RS-485

表8.2　ARCNET管脚分配

管脚编号	信号名称	输入/输出	功　能
1	N.C	—	—
2	N.C	—	—
3	PH－B	输入/输出	线路连接端子,双绞线的B侧
4	PH－A	输入/输出	线路连接端子,双绞线的A侧
5	N.C	—	—
6	N.C	—	—

在ARCNET协议中有对插头和电气特性的规定,都是以已经颁布的标准为基准。RJ-11接头是以**FCC**(Federal Communications Commission,美国联邦通信委员会)规定为基准的普通商品,所谓RS-485型是表示与**EIA**(Electronic Industries Alliance,美国电子工业会)中规定的RS-485的电气特性相同的意思,用于普通用途。

FCC

EIA

有时协议也会单独规定接头和电气特性,但大多数是以ARCNET这种使用已有的接头和电气特性,而使数据的操作顺序等具有独立性。

软件接口

PA10-7C的软件接口使用PA程序库。例如,使机器人各轴动作的函数的规定如图8.26所示。如程序所述,将功能"呼出",就能够生成不用自己进行程序设计而是利用其功能的软件。

用户接口

用户接口是操作者操作机器人的接口。PA10-7C是使用图8.27所示的操作辅助程序。按下机器人的功能按钮,

通过输入数值就能够操作机器人。除了可以用操作辅助程序以外，如图 8.28 所示，通过简单的模拟为操作者提供操作对象状态的也是接口。

```
Pa_exe_axs
功能
  进行各轴动作.
语句
  long pa_exe_axs(ARM armno,AXIS axis,ANGLEP angle, long func)

  armno 手臂No.
  axis  动作轴指定用enum AXIS指定
    能够选择多个轴.  (ex)(S1|S2|S3)
  angle 动作角度   用按钮型ANGLEP指定结构件ANGLE.
  func  指定是否等待到动作结束.
说明
  由axis指定的轴通过误差角速度动作到用angle指定的角度.
  这个函数通过func完成以下动作.
  指定WM_WAIT：动作结束前不返回.
  指定WM_NOWAIT：不确认动作结束返回.
返回值
  ERR_OK  正常结束
  其他   异常结束  参照错误表
参照
  pa_set_vel
描述例
    :
  ANGLE ang;

  ang.s1=1.57;
  ang.s2=1.57;
  ang.w2=1.57;
  pa_exe_axs(ARM1,S1|S2|W2,&ang,WM_WAIT);
                  … 使S1,S2,W2轴转1.57[ rad]
```

图 8.26　各个轴动作的描述方法



图 8.27　用户接口操作辅助程序

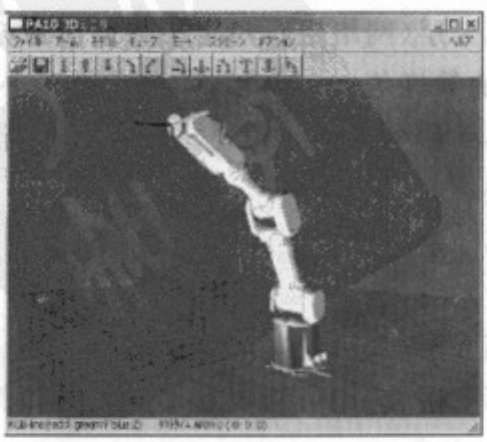


图 8.28　用户接口简单的模拟

相关知识

◆ 协　议

协议是计算机之间通过网络进行通信时，对通信双方之间规定的集合。有时也称为通信顺序或通信规定等。

人与人之间的通信可分为使用的语言（日语、英语）、使用的媒介（电话、书信）等多个不同层次。同理，计算机之间的通信也可以将协议的作用分成几个层次。

协议层次化的模型是由国际标准化机构（**ISO**）和国际电气通信联合（ITU）等机构进行标准化的 7 层次的 OSI 参考模型，以此对协议进行分类。

现在互联网用的标准 IP 是第 3 层（网络层）的协议，TCP 和 UDP 是第 4 层（传输层）的协议，HTTP、FTP、SMTP 及 POP 等是第 5 层（会话层）以上的协议。

◆ OSI 参考模型

OSI 参考模型是由国际标准化机构（ISO）制定的，以为实现在不同机种之间进行数据通信的网络构造设计方针 OSI（Open Systems Interconnection）为基础，将计算机应具有的通信功能划分成层次结构的模型，也被称为 OSI 基本参考模型或 OSI 层次模型。将通信功能分成 7 层，将每一层都定义为标准的功能模块。

第 1 层（物理层）：规定了使用网络传输数据时的电气转换（电压和比特的关系等）和机械条件（接头的形状和电缆的特性等）。

第 2 层（数据链路层）：规定了向网络传送数据的方法，以及传输过程中的数据错误检查等。

第 3 层（网络层）：规定了与通信对方的数据传输路径的选择、网络地址（IP 地址）的管理等。

第 4 层（传输层）：规定了错误修正、再次发送控制等保证数据可靠性的方法。

第 5 层（会话层）：规定了通信程序之间的数据传输顺序（关系的确定和终止）。

第 6 层（表示层）：规定了文字代码、数据压缩、暗号化等数据的表示方法。

第 7 层（应用层）：规定了向人类和其他程序提供使用数据通信的各种服务的方法。

题外话

并行接口和串行接口

对于数据传输用的接口，若增加信号线的数量，则使在一个循环中能够传输的数据量增加。缩短循环时间，也可使单位时间内能够传输的数据量增加，实现高速度化。但是，当前的高速并行接口还处于不能够去除畸变（信号不能够同时到达的现象）影响的阶段。这是因为数据传输的主流已经转移到在原理上不考虑畸变影响的串行接口。

由于串行接口的配线数量较少，所以，与并行接口相比有能够实现接头和设备小型化的特点。

8　机器人的检查

要　点

随着机器人动作离线模拟的实用化，要求机器人具有能够与模拟动作相同的绝对位置和姿态精度。近年来，由于坐标测量技术和机器人误差分析技术的使用，使这种机器人的制造成为可能。

解　释

离线模拟

机器人的示教工作几乎都是在现场使用实机进行的。但是，因为使用实机的示教必须使用机器人操作，这是需要花费人力和时间的工作。如果要进行高水平的示教，还需要操作者有较高的技术水平。

另外，在生产现场进行机器人的示教工作要停止生产，这便使生产效率降低。因此，近年来的示教主流是在计算机上模拟生产线上的机器人，事先进行模拟检查，称之为**离线模拟**。通过离线模拟可以缩短实际生产线的停产时间，并且，即使没有高水平的机器人操作者也能够进行机器人的程序设计。

离线模拟

离线模拟存在的问题

离线模拟也存在问题。这就是通过模拟进行的示教，在实际机器人上再现时，机器人的动作与模拟不同。这一问题产生的主要原因是模拟为理想的机器人，与实际的机器人之间存在误差。

对于模拟与实际机器人之间的差别，位置姿态的误差是最大的问题之一。由于存在这一误差，使通过模拟进行的示教不能够直接用于制造现场，而必须通过现场进行**示教修正**才能够使用。

示教修正

绝对位置精度和绝对姿态精度

为了使现场示教修正的时间最小化，要求机器人的技术必须保证**绝对位置精度**和**绝对姿态精度**（以下将两者统称为**绝对精度**）。由此才能够开发出实际动作与模拟的理

绝对位置精度
绝对姿态精度
绝对精度

想机器人动作相同的机器人。

以欧洲的汽车制造商为主的许多制造商都以保证绝对精度的机器人作为购买条件。

由于机器人具有绝对精度，可以应用于切削等加工和作为坐标测量仪使用等，今后，机器人的使用范围将更加广泛。能够保证绝对精度的 PA10-7C 已经在上述的各领域中实际使用。

控制模块

能够保证绝对精度的机器人从外观上看与普通的机器人系统的构成相同。但是，控制器内部使用的确是与以前不同的技术。如图 8.29 中 PA10-7C 的控制方框图所示，与普通机器人最大的不同之处是使用了通过检测和分析制作的实际机器人模型。考虑误差因素将实际机器人模型用于控制，使具有绝对精度的机器人的动作成为可能。

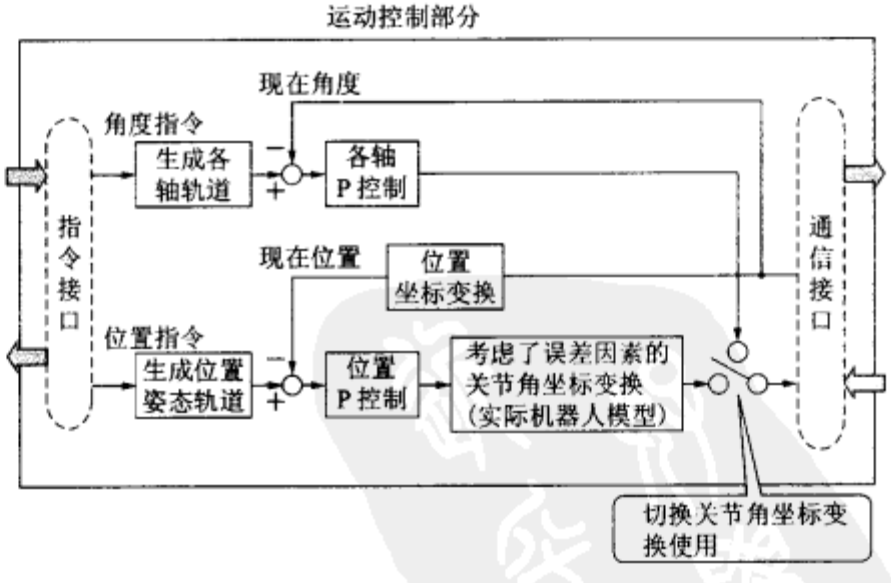


图 8.29 保证绝对精度的控制模块(运动控制部分)

PA10-7C 是将程序库化的绝对位置控制作为软件的一部分。因此，通过软件开关就可以简单地转换原有的控制和绝对位置控制。

为了保证绝对精度，需要注意的事项详细介绍如下。

扩展的理想机器人模型

无论何种机器人的控制都要使用机器人的数学模型。

理想机器人模型

通常这些已经数字化的理想机器人的数学模型，将其称为**理想机器人模型**。但是，为了实现绝对精度，机器人需要的各种误差因素也要模型化。即需要制作是扩展的理想机器人模型，它增加了与理想机器人模型的误差因素参数。这种扩展的理想机器人模型的误差参数是以误差为零制作的。

包含几何误差的主要误差参数如下。

编码器的偏置

① **编码器的偏置**：是安装在各回转轴上的编码器的输出与零点的偏差。7轴机器人有7个参数。

几何误差

② **几何误差**：这是与D-H参数的设计值的偏差，也是在制作机器人时产生加工、制作误差的主要原因。与编码器的偏置相同，7轴机器人最少有7个D-H参数。

柔量

③ **柔量**：由于在机器人上安装的工具和机器人的质量等原因，受重力影响产生的力矩对各旋转轴和连杆的刚性。理想机器人具有无限的刚性，但实际的机器人对力矩将产生扭转和弯曲。通常被称为“应变”。一般认为对旋转轴有旋转方向刚性和其垂直方向的刚性，所以，1个旋转轴有2个参数，即7轴机器人有14个参数。对于连杆，因其形状的不同，最少有1个参数，故7轴机器人最少有6个参数。

这些误差因素的概念如图8.30所示。

检测与分析

机器人个体的误差检测使用三维测量仪(X,Y,Z)或六维测量仪(X,Y,Z，倾斜角，俯仰角，偏转角)。由于机器人是进行六维动作的机器，所以使用**六维测量仪**较好。

六维测量仪

六维测量仪如图8.31所示。

检测和分析的方法有将各轴的各参数分别检测的方法和将多个参数通过收敛计算一起分析的方法。对于前者，各参数的分解比较容易，但检测却需要花费许多时间和精力；对于后者，因为要同时求解多个参数，所以必须要考虑参数间的冗余性，与前者正好相反，检测所需花费的时间和精力很少。但是，需要注意的是，如果考虑冗余性时出错，那么求解计算就永远不能收敛。关于冗余性的问题，已经在近几年的分析软件中得到解决。例如，ROCAL-ID软件

就具有能够预测冗余性并自动排除的功能，所以，这一软件能够准确并快速地进行收敛计算。

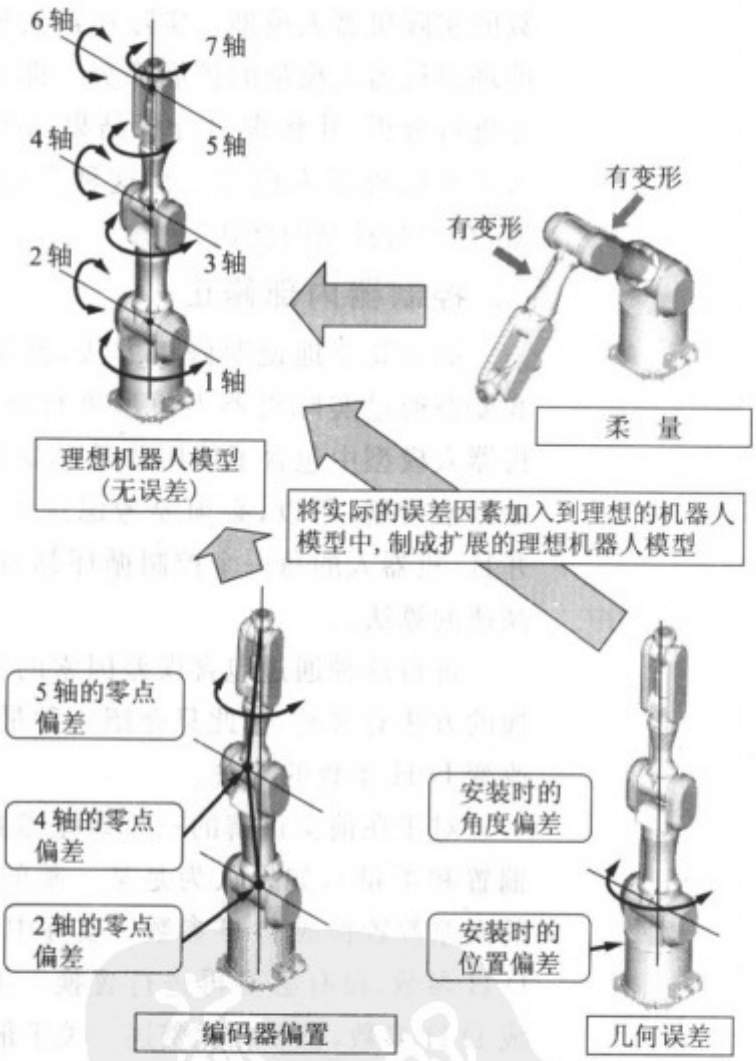


图 8.30 误差因素的概念



图 8.31 METRIS 公司制造的 K600 型六维测量仪

实际的机器人模型

如果完成了上述的分析过程，则可以制作包含误差参数的实际机器人模型。实际机器人模型是如前所述的扩展的理想机器人模型的扩展部分。即将模型化的误差因素部分进行分析，并将求出分析结果的实际机器人的误差值装入扩展的机器人模型。将这种实际机器人模型装入控制器，在进行控制时使用。

控制器内部修正

如果简单地说明修正方法，就是对要达到的目标位置和姿态通过实际机器人模型进行逆变换。但是，由于实际机器人模型中包含了使用普通逆变换的几何构造以外的误差因素模型，所以，必须要考虑这种因素后再进行逆变换。并且，机器人的每一个控制循环都需要进行运算，这就要有高速的算法。

进行这种通过包含误差因素的实际机器人模型的逆变换的方法有多种，在此只介绍一种最常使用的方法，即通过改变 D-H 参数的方法。

对于在前文讲解的三个误差参数（几何误差、编码器的偏置和柔量），如果认为是某一瞬间的控制，则能够将所有的误差都置换成 D-H 参数。实际中的几何误差已经是这种 D-H 参数，没有必要再进行置换。编码器的偏置能够置换成 D-H 参数，就不在此赘述。关于最后一项的柔量，假设在某一瞬间，机器人的姿态是一定的，如果知道了机器人自身的各轴、各连杆的自重及重心位置、工具的质量及重心位置，则通过重力就能够计算出施加在各轴上的力矩。由于实际机器人模型上的各轴和各连杆的强度已经参数化了，如果施加的力矩已知，就能够计算出变形量。再将这种变形量用 D-H 参数表示，就可以得到考虑了某一瞬间误差的 D-H 参数。这样，使用每一瞬时的 D-H 参数进行每个控制循环的逆变换，便最终能够得到实现准确目标的各轴的数值。

9 机器人与安全管理

要 点

机器人的安全包括必须保证机器人自身的安全性和使用机器人时的安全性。因此，设计者必须根据JIS标准和IEC标准等的规定进行设计和制造，机器人的使用者也有按照法令和规定保证安全的义务。服务用的机器人需要与人类共同生活和接触，必须制定有关安全性的规则。

解 释

设计和制作的安全保障

工业机器人的安全标准 工业机器人与一般的自动机械不同，是具有许多自由度的多轴机械，能够在很大的空间范围内动作，由于在发生故障时使用者很难预测机器人将如何动作，因此，为了防止事故的发生，在设计时要经过充分分析后制定出保证安全的措施。

在设计和制造工业机器人时的安全方针有JIS B 8433：1993(ISO 10218：1992)“产业用操纵机器人——安全性”标准。这个标准是根据ISO 10218制定的，是从全球整体的**安全性**的角度出发制定的。这个标准对设计、制造、程序设计、运转、使用、维护和修理方面都给予了安全上的考虑。

安全性

日本的机器人产业是产量占全世界的60%以上、50%出口的重要产业，从国际影响方面考虑也要求遵守有关安全性的规定。

安全分析

适用于本标准的机器人是经过**安全分析**评定结果为有危险的机器人，评定结果为没有危险的机器人不适用于本标准。

美国的机器人安全标准 美国的机器人安全标准“ANSI/RIA R15.06”是1996年6月制定的。经过了2年的试用期，从2001年6月开始正式执行。该标准的规定与ISO 12100系列的机械类的安全没有较大的出入，但吸收了较多国际安全标准的思想，其目的是强化安全。

机械的安全标准 机器人的机械包括控制装置、数据处理部分、传感器保护装置、动力制动部分和执行装置等。

因此适用于以下有关机械类安全的工业标准，要求按照这些标准进行设计。

JIS B 9700-1:2004(ISO 12100-1:2003)。

“机械类的安全性——设计的基本概念，一般通则——第1部分：基本用语，方法论”。

JIS B 9700-2:2004(ISO 12100-2:2003)。

“机械类的安全性——设计的基本概念，一般通则——第2部分：技术原则”。

机械类的安全标准体系的构成如图8.32所示，设计时必须要认真参照相关标准执行。

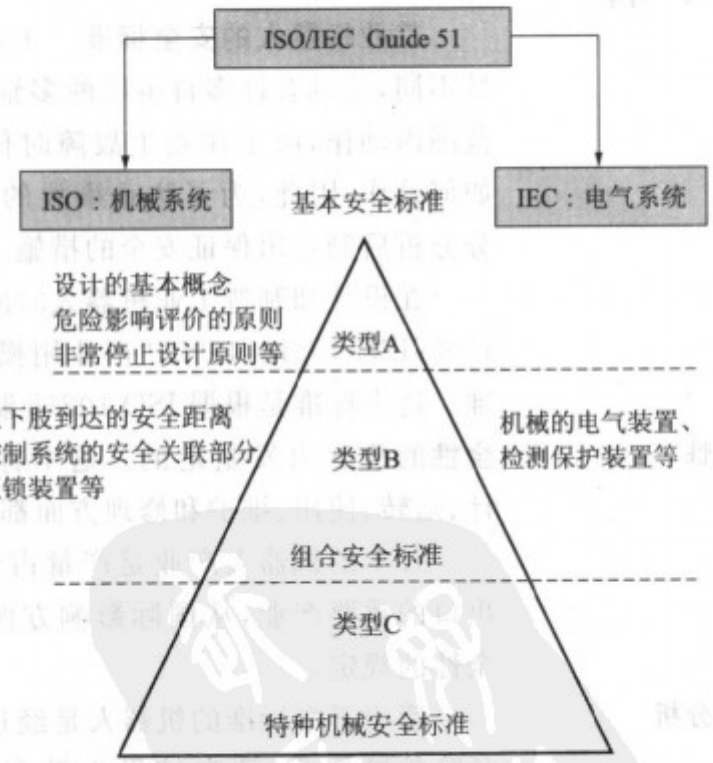


图8.32　机械类安全标准体系的构成

实质性的安全设计

残留危险

ISO 12100的国际安全方针是通过3个步骤来减少危险的。即从完全消除危险是不可能的观点出发，通过**实质性的安全设计**来减少危险，对于仍不能够消除的**残留危险**实行安全保护的措施，如图8.33所示。如果在采取了这些措施后仍然存在危险，就要在使用上进行警告。

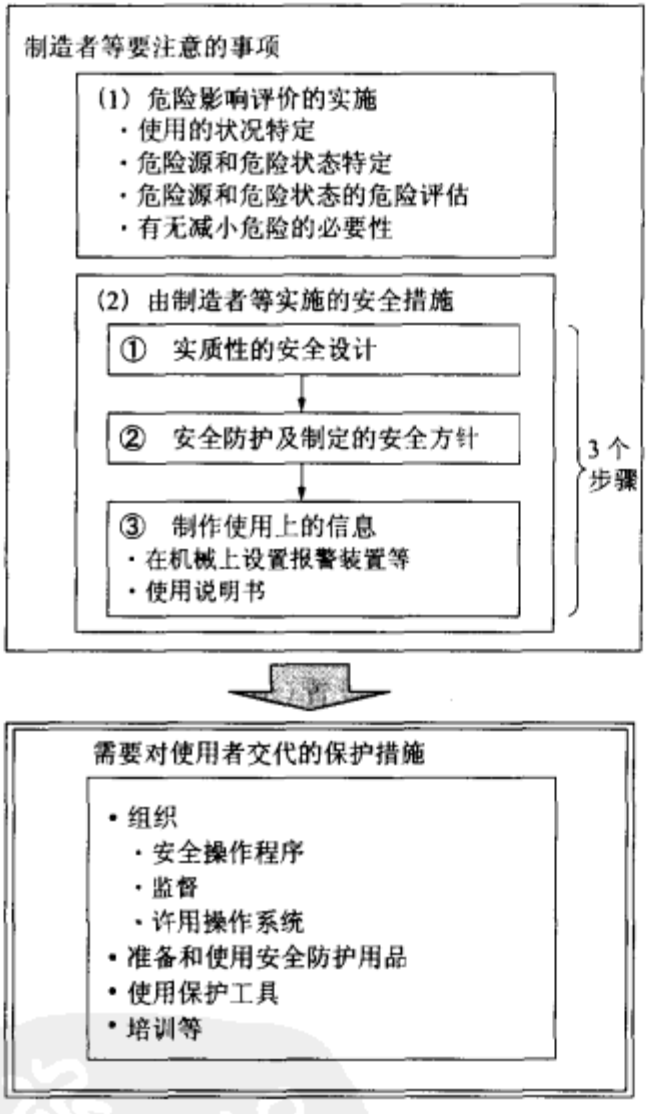


图 8.33 从设计上减小危险的过程

机械的实质性的安全设计 这是从机械和装置的设计上考虑安全，或者通过改变运转特性，不使用卡和其他附加保护装置来消除危险源或减少危险的想法。

危险影响评价 因为机器人是能够将危险减小到一定范围的安全机械，所以必须按照适当的危险评估的顺序进行安全性设计。

JIS B 9702：2000（ISO 14121：1999）“机械类的安全性——危险影响评价的原则”是实施危险影响评价时的指导方针，规定了鉴定危险源、估计危险及危险评价的程序。

其他的参考标准如下。

JIS B 9703:2000“机械类的安全性——紧急停止——设计原则”。

JIS B 9704-2:2000“机械类的安全性——电气检测保护设备——第2部分:对于使用有源光电保护装置的设备的要求事项”。

JIS B 9960-1:1999“机械类的安全性——机械的电气装置——第1部分:一般要求事项”。

机器人使用时的安全

要保证机器人使用时的安全,必须遵循劳动安全卫生法及其实施令、劳动安全卫生规则、电气设备技术基准等的规定。

机器人设置的管理者有义务根据法令和规定来安排机器人的主要操作者、为防止运转中危险的栅栏等**防止接触装置**的设置(劳动安全卫生法第150条)、**操作规程**的策划制定、显示和全面检查等。对从事机器人操作的操作人员必须进行“”,组织学习“安全卫生**特别教育**规程第18条和第19条”中的规定。

防止接触装置
操作规程
特别教育

服务用机器人的安全

服务用机器人的安全标准　服务用机器人占所有机器人的比例,在2004年大约为3%,在今后带动机器人产业的将是与人类共同生活的伙伴型的服务用机器人。服务用机器人与人类接触,动作复杂,不允许有误动作等。目前,关于服务用机器人的安全标准尚未完善。

既要承认危险的存在,又要承认服务的价值。在这种情况下需要制定出能够接受的在生活中与机器人共存的规则。

安全装置与故障检查　**安全装置**是机器人出现异常时能够被固定在安全一侧的机构。由紧急停止回路和防止再起动回路等构成,能够将损害控制到最小程度。

安全装置

故障检查是防止因错误的使用、操作及人为错误损害的部分。

故障检查

由于服务用机器人是供不具备专业知识的用户使用,所以必须采用基于安全装置和故障检查的安全系统。

10　未来的机器人

要　点

在日本，工业机器人的生产量、生产现场的使用量及机器人的出口量均居世界第一，日本素有机器人王国之称。但是，还有许多在今后能够实用化的、能够在生产和生活中发挥作用的机器人技术需要研究。特别是生活、福利、灾害援助等非制造业的机器人的研究与开发，已经陆续进入到实用化阶段。

解　释

工业机器人普及的现状

2002 年末，世界上的工业机器人的保有量大约为 77 万台，其中在日本国内工作的约为 35 万台，达到全世界的 45%（根据国际机器人联盟统计）。2000 年的生产量约 9 万台，产值达到 6500 亿日元的顶峰后，因国内设备投资的不景气而停滞不前。

工业机器人应用的行业以汽车和电气机械制造业为最多，普通机械和塑料行业次之，非制造业的应用最少，还有待今后的开发。应用机器人的企业 80%为大企业，所以，今后需要促进在占日本企业数量 99%的中、小企业中的应用。

据市场的预测，2025 年工业机器人将达到 8 万亿日元的规模，期待着它能够起到拉动日本产业的作用。

机器人使用的现状

小品种、大批量生产等适合机器人生产的作业大多已经机器人化。今后为稳定生产要陆续使用机器人的将占有较大的比例。工业机器人今后有待解决的课题还很多，如多品种小批量生产和熟练工种的替代、在毛坯材料行业为改善劳动环境的应用、扩大在非制造业中的应用等。

零生产方式

零库存是指“在需要的时间只生产需要的量”。现在流行的是实现零库存的**零生产方式**，并获得了较好的效果。其原因是在制造生产线上的机器人不能够发挥熟记目录的“通用性”，图 8.34 所示为程序化的专用机器人的工作状况。虽然通过图像处理已经能够将随机堆放的零件理出头

绪，但仍然需要专业人员的帮助。

毛坯材料等行业是3K（累、脏、危险）作业，虽然也有机器人的应用，但还不能够充分适应。这些行业的生产因熟练工人的大量退休和年轻一代工人的不足，以及与产品制造产业的脱离，已经给国内的制造业带来较大的负面影响。

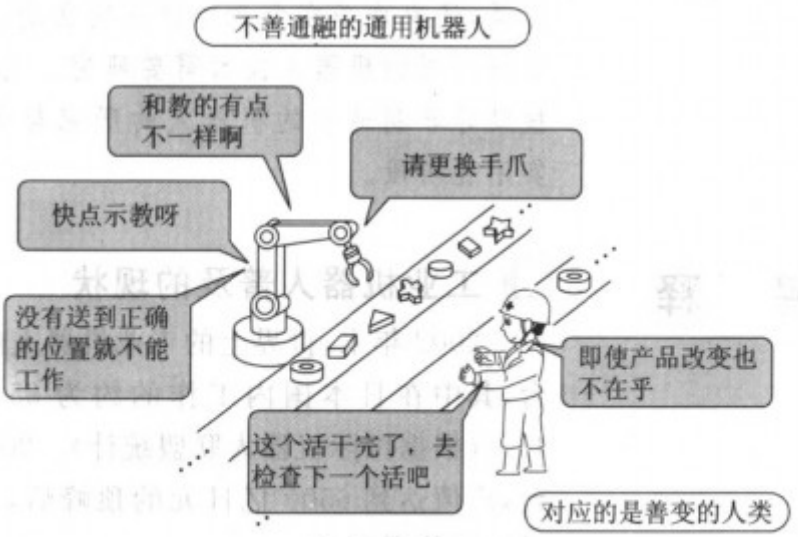


图 8.34　通用机器人与专用机器人

开发新的应用领域

由于对机器人研究和开发技术的不断进步，已经在以前意想不到的工作中得到应用，以及在生活中使用服务机器人等。根据对机器人产业的市场需求预测，可以预见今后机器人的应用领域将是医疗福利领域、生物产业领域、公共领域和生活领域。

例如，功能恢复训练、辅助护理、检测诊断和辅助手术等医疗福利领域的应用，农业、林业、畜牧业、水产业等非固定形式的作业和劳动力不足领域的应用，宇宙、海洋、原子能、探测地雷以及微生物等危险且需要超出人类能力作业的领域，人员密集型且需要自动化的物流、保安、清扫、生活线路的维护及收发等办公服务等领域，定位在普通使用者的生活服务、家务服务、教育、不喜欢的工作、值班等行业，消防和救灾等公共领域，娱乐机器人等。

应用机器人的这些领域几乎都是为了改善环境、解决劳动力不足及医疗福利等社会需求的问题，并且需求在今

后还将会不断增加。

研究开发的动向

日本的机器人，虽然在工业机器人的产量上具有绝对的竞争优势，但是，许多领域在国际的竞争中不占优势，如原子能、宇宙、海洋、灾害、医疗福利等非制造领域的机器人技术，以及高智能化的软件技术、媒体技术、网络技术等。

另外，机器人的研究成果在工业机器人制造技术中的应用、研究及与应用脱节也是需要研究的课题之一，期待着今后能够研究开发出在新领域应用的机器人。

现在，可以说能够与人类和谐共存的第四代机器人已经进入实用化阶段，今后需要研究开发的课题如表 8.3 所示。

表 8.3 今后研究开发的课题

需要研究开发的题目
· 在生活环境中的移动技术(两脚步行技术等)
· 环境识别(距离、水平、方向)
· 躲避障碍物的移动
· 与人类共存的安全技术
· 声音识别和会话
· 远程操作
· 非接触的识别和判断

未来的机器人

自 1954 年美国的 Geore C. Devol 申请了“通过示教和重放放置和夹持物体的机械”的专利以来，随着控制技术和计算机技术的发展，机器人得到迅速发展。机器人已经经历了三代。

第一代机器人：应用自动控制理论、反馈控制理论、NC 控制等研究开发的再现机器人。

第二代机器人：将人工智能应用于机器人开发的自律控制机器人。

第三代机器人：应用了移动和远程控制研究成果开发

的再现机器人。

现在，研究开发的是在生活中与人类和谐共存的服务机器人，已经进入到第四代机器人的时代。

今后的任务是将已经实用化的机器人高水平化，及开发新的应用领域等，下面例举的是将活跃在21世纪的机器人（引自：《开辟21世纪日本的机器人产业》P.6～7，日本机器人工业会）。

日本在21世纪必须要面对生育少且老年化、环境和能源等非常严峻的社会问题，同时希望能够在迅速发展的全球化潮流中保持工业的竞争活力，实现富裕的社会生活。

因此，营造使国民能够安心生活的环境、更加丰富和宽余的品质是不可缺少的，为了实现这些课题和实现富裕的社会，希望机器人的技术能够进一步地提高。

如前所述，机器人的普及是在制造现场以制造为中心展开的，进一步提高机器人技术以期能够在各个领域中均有应用。

制造领域

①**制造领域**：通过机器人技术的提高，使机器人在更加广阔的领域和生产中应用，如进行超微工业产品的加工、组装的微型制造技术等（见图8.35）。

农业

②**农业**：在农业（种植、洒农药、收获蔬菜和果实等）、畜

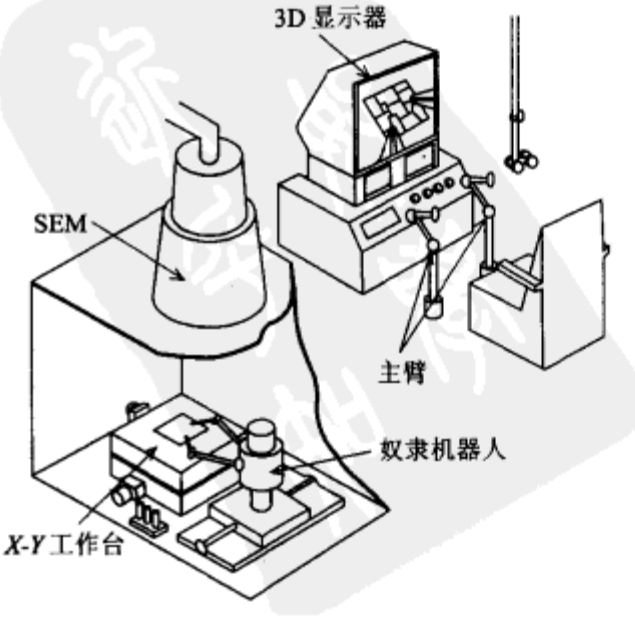


图8.35　微型制造

牧业(挤奶、粪便处理等)和林业(植树和采伐等)中应用的机器人技术(见图 8.36)。

维护

③**维护**:对各种社会资源(公路、铁路、港口、飞机场、广播和通信等交通和通信设施;上下水管、垃圾处理厂和公园等生活基础设施等方面)进行定期检查、保养、拆除等维护的机器人(见图 8.37)。



图 8.36　收获番茄的机器人

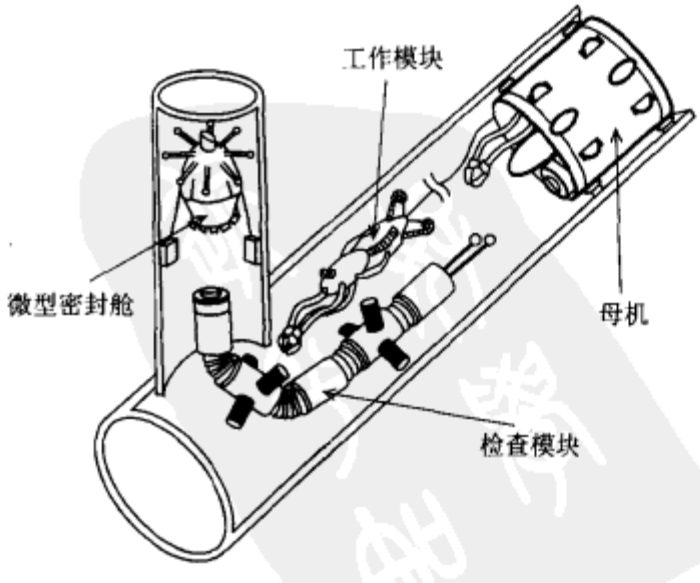


图 8.37　在细管内进行维护作业的微型系统

灾害救助

④**灾害救助**:在地震、台风和洪水、火山爆发、火灾等灾害中进行搜索救人、灭火、拆除和整理等恢复工作的机器人(见图 8.38)。

海洋领域

⑤**海洋领域**：建设水中建筑物时，进行各种操作和焊接工作、铺设和修补海底电缆、海底矿物资源的开采、多用途观测等作业的机器人（见图 8.39）。

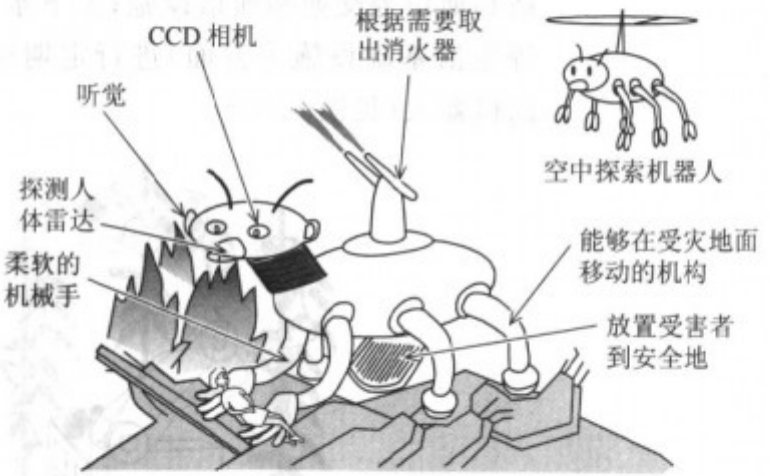


图 8.38　救援机器人

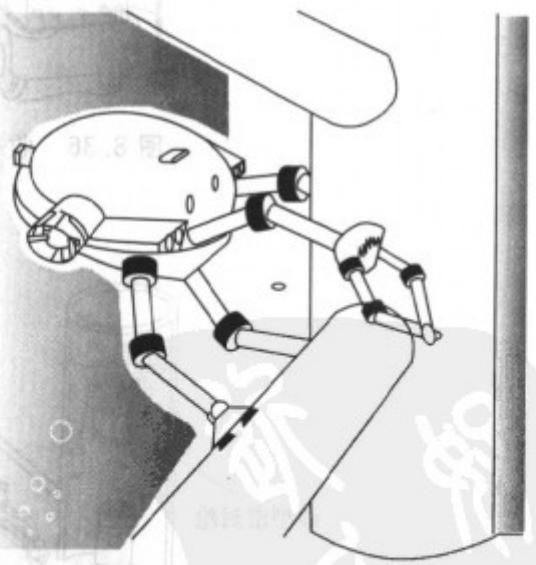


图 8.39　对海水中的构件进行维护

宇宙领域

⑥**宇宙领域**：在宇宙空间中进行空间站的安装和维护、为人造卫星补给燃料及其回收和分解、在行星表面自律地进行矿物开采和地质调查等的机器人（见图 8.40）。

医疗和福利

⑦**医疗和福利**：在医疗领域有使用机器人做手术，或通过微创治疗和远程治疗系统对手术者进行帮助的机器人。在福利方面是对身体有障碍的人或卧床的老人进行日常生活的帮助和护理，以及帮助手脚有障碍的人融入社会的机

器人(见图 8.41)。

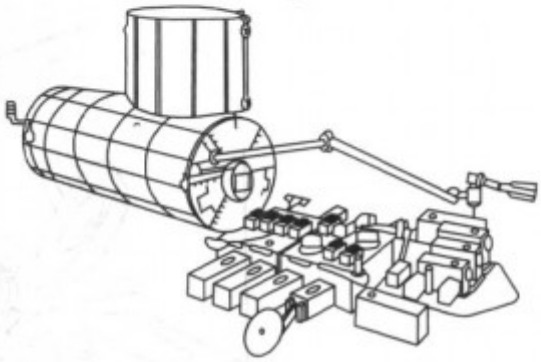


图 8.40 日本的实验模块(JEM)



图 8.41 洗浴护理机器人

家庭自动化

⑧**家庭自动化**:有帮助老年人和身体有障碍的人自立,以及减轻双职工等的家务劳动为目的进行家务服务(烹饪、整理、扫除、育儿、看家等)的机器人(见图 8.42)。

娱乐

⑨**娱乐**:在日常生活中用于个人娱乐或学习为目的的宠物、学习教练等机器人和娱乐设施机器人(见图 8.43、图8.44)。



图 8.42　从事家务的机器人



图 8.43　娱乐机器人

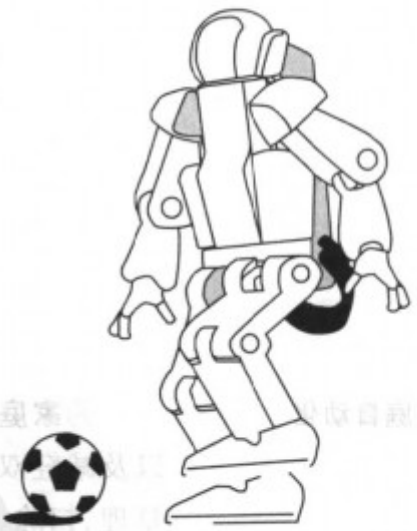


图 8.44　能够踢运动着的足球的机器人

第 9 章

机电一体化的实践

● 责任编委
久慈俊夫
● 执　　笔
久慈俊夫(1)
富崎秀德(2)
井藤功久(3)
下笹洋一(4)
小林一行(5)
并木明夫(6)
丸山八雄(7)
藤田善弘(8)

本章通过实例说明将机械、电子、计算机控制和信息等主要技术有机结合，进行机电一体化的技术开发和产品开发的过程。

通过双足步行机器人能够学习多轴机械及其控制，而自动剪票机在机械开发和系统化方面具有显著特点，并可从中看到机电一体化技术的应用效果。

从本章各节的实例中可以发现，在机电一体化的应用领域中为提高生活水平，不是简单地将各种主要技术组合，而是逐渐产生和发展的技术与机电一体化主要技术的巧妙融合。

1　X-Y 工作台的制作

要　点

X-Y 工作台是直角坐标系机器人的基本形式，其移动速度和定位精度与控制电机的每转指令脉冲数、指令脉冲速度及滚珠丝杠的螺距有关。关节机器人也存在这些关系，所以，必须理解速度和定位精度的基本关系。

解　释

X-Y 工作台的机械部分

图 9.1 所示为 X-Y 工作台的一个坐标的基本结构，一个坐标的基本结构尺寸确定后，可以扩展到二个坐标(X-Y)和三个坐标(X-Y-Z)。

该工作台具有结构简单、刚性好、成本低等特点，可应用于零件的插入、装配、二维焊接和图像测试等。

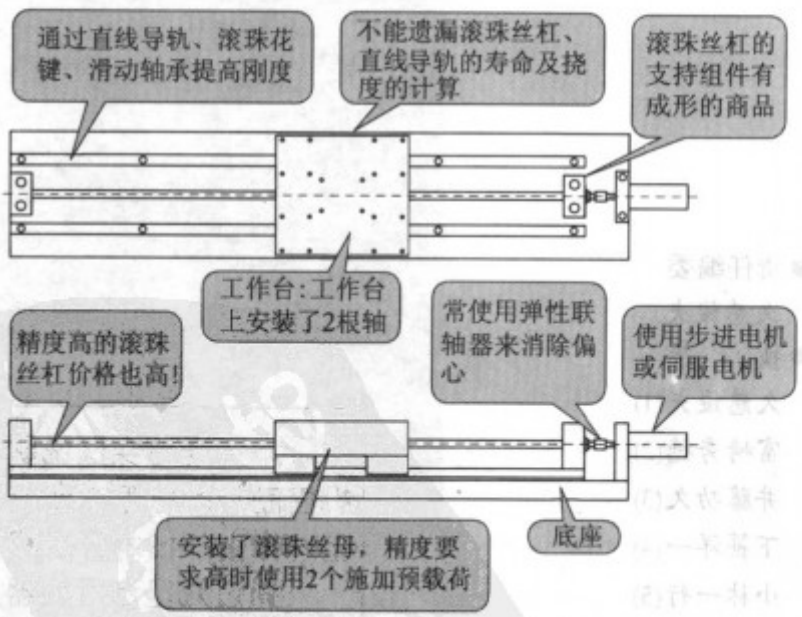


图 9.1　X-Y 工作台的基本结构

X-Y 工作台的结构设计

定位精度的设计　设控制用电机每转所需指令脉冲数为 P_r(pulse/r)，这时，滚珠丝杠的导程为 l(mm)，则每个指令脉冲工作台的移动量 δ(mm/pulse)为：

$$\delta = l/P_r \tag{9.1}$$

最小定位精度

这就是**最小定位精度**。

在需要绝对定位精度时，就要选用高精度等级的滚珠丝杠，并采用双螺母结构，通过施加预载荷来消除螺纹间隙，以保证定位精度。

移动速度的设计 设电机转速为 R(r/min)，则工作台移动速度 V_T(mm/s)为：

$$V_T = l \times R/60 \tag{9.2}$$

若电机指令脉冲的发送频率为 V_p(pulse/s)，则式(9.2)可写成

$$V_T = \delta \times V_p \tag{9.3}$$

由上面的关系可知，滚珠丝杠的导程 l 越小，电机的分辨率越高，定位精度也越高。若使工作台快速移动，只要取较大的 l 值或脉冲的发送频率 V_p 值即可。但是，电机控制器和电机本身的性能都有一定限度，超过一定的发送频率 V_p 就很难保证正常工作。所以，高速度和高精度是对立的，协调好两者的关系十分重要。

控制电机的选择 电机驱动机械负载工作时所产生的转矩 T(N·m)为：

$$T = J \times \dot{\omega} + D \times \omega + T_L(\text{N} \cdot \text{m}) \tag{9.4}$$

电机轴上的惯性矩

式中，J 为换算到**电机轴上的惯性矩**的总和；D 为与角速度成比例的负载转矩；T_L 为**摩擦负载转矩**。

摩擦负载转矩

实际使用中，由于第 2 项很小，往往略去不计，则式(9.4)可简化为

$$T = J \times \dot{\omega} + T_L(\text{N} \cdot \text{m}) \tag{9.5}$$

式(9.5)的第 1 项与角加速度成正比。与机械惯性一样，当工作台加速移动时，需要驱动电机提供一个很大的加速转矩。但是，当电机起动后以恒定转速运行时，角加速度为零，电机所需要的转矩就只有第 2 项的恒定负载转矩。

由于进行频繁和急剧地加速和减速运行需要大容量的电机，所以，使电机小型化最重要的一点就是要平滑地控制加速和减速。

***X-Y* 工作台的控制** 当工作台的移动需要较高精度时，可以采用线性传感器来检测并反馈工作台的移动，这便

闭环控制系统　构成**闭环控制系统**。很多情况下为了简化结构，X-Y工作台可以采用步进电机的**开环控制**，或装有编码器和旋转变压器的伺服电机的**半闭环控制**。

开环控制

半闭环控制

无论采用哪一种情况，由于相当于1个指令脉冲的位移量 δ(mm/pulse)是已知的，要到达目标位置，只要向电机控制器输出所需的脉冲数就可以了。

当电机将处于启动、停止时，为防止电机过载，控制脉冲频率逐渐增加或减小，能够平滑地控制工作台的加、减速，称为**加、减速控制**，通常采用梯形曲线或凸形曲线的加、减速控制模式。

加、减速控制

另外，根据送到X、Y两个坐标的脉冲比例的变化，工作台可以描绘出不同的移动曲线，如直线、圆弧或花键曲线等，这种控制称为**插补控制**。

插补控制

相关知识

◆ 惯性矩的定义

惯性矩的定义如图9.2所示。由图可知，微元的惯性矩就是从旋转中心到微元的距离的平方与微元质量的乘积，而整个旋转体的惯性矩则是组成旋转体的所有微元的惯性矩的总和。这一定义可用公式表示为

$$J = m_1 r_1^{\ 2} + m_2 r_2^{\ 2} + \cdots + m_i r_i^{\ 2} = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^{\ 2} \tag{9.6}$$

由式(9.6)可知，由于惯性矩与到旋转中心的距离平方成正比，因此，对于控制性能优良的机械，设计时零、部件的配置是非常重要的。

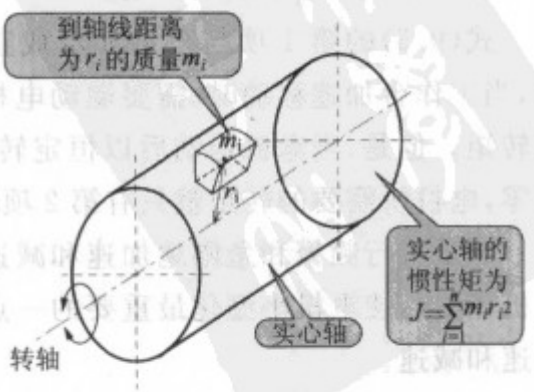


图9.2　惯性矩的定义

计算出由电机驱动的所有零、部件的惯性矩及其总和后就可以按式(9.5)求得电机所需要的驱动转矩。

◆ **负载力矩的实测**

由于加工、装配等原因，零、部件的形状(质量)与设计值相比会有微小的差异，机械效率、摩擦因数的选取等原因，电机转矩与理论值相比也会存在偏差。因此，机械的驱动转矩需要用试验的方法求取。一种实用的求取驱动转矩的方法如图 9.3 所示。

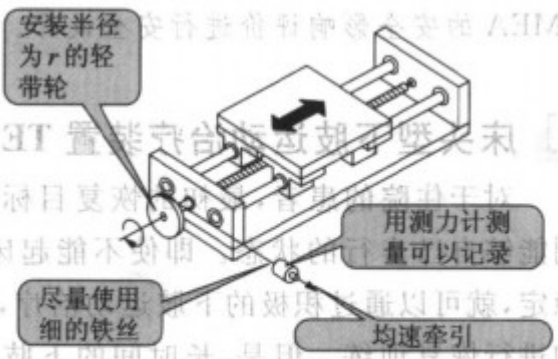


图 9.3 负载力矩的实测

在机械的驱动轴上安装一个半径为 r 的带轮，将细铁丝卷绕在带轮上。细铁丝的一端固定在弹簧秤或测力计上并以一定速度平行牵引，测量开始移动时的力 F_s 和以一定速度移动时的力 F_f，则

静摩擦力矩 $T_s=F_s r$

动摩擦力矩 $T_f=F_f r$

利用以上两式就可以求出驱动机械所需的基本转矩。

篇外话

X-Y 工作台的应用实例

将 X-Y 工作台机构应用到数控铣床、数控加工中心上，可以实现工件在平面上的二维移动。与直角坐标系机器人不同的是，在数控机床中应用时，X-Y 工作台需要很高的刚性，在控制上采用 NC 代码。

要求高精度时，X-Y 工作台的机构中也使用三坐标测量仪。在木工机械等需要特殊动作且批量较小的自动机床上再追加一个平行于旋转刀具轴的 Z 轴，利用个人计算机或程序装置进行控制就可以制成三维加工机床。

2　下肢功能恢复训练机器人

要　点

以床头型下肢运动治疗装置 TEM*LX2(以下称 TEM LX2)为例,说明下肢功能恢复训练机器人。在设计 TEM LX2 时,考虑到是在治疗现场使用,通过简洁的设计和菜单操作方式提高装置的操作性能,依据安全标准以及 FTA、FMEA 的安全影响评价进行安全设计。

解　释

床头型下肢运动治疗装置 TEM LX2

对于住院的患者,最初的恢复目标是将身体功能恢复到能够自己步行的状态。即使不能起床,只要呼吸等情况稳定,就可以通过积极的下肢运动治疗,预防各种功能不全和进行恢复训练。但是,长时间的下肢运动训练给医护人员和患者家属带来很大的身体和精神负担。基于这种考虑,人们开发出下肢功能恢复训练机器人,目的是使脑血栓急性期患者早日脱离病床并康复。

TEM LX2 中装入了康复专家进行理疗的运动疗法模式,就是能够根据患者的身体状况进行下肢运动的下肢功能恢复训练机器人。

TEM LX2 的外观如图 9.4 所示。它的本体上安装了小脚轮能够移动,本体上的机器人手臂和控制装置制成一体化,是通用型的机器人系统。



图 9.4　TEM LX2 的外观

TEM LX2 的使用说明如表 9.1 所示。对象患者的体格是根据日本人的平均身高、体重分别考虑后设计的。关节的活动范围和最大关节角速度则是根

*TEM 是安川电机株式会社的注册商标。

据人体的平均关节活动范围、理疗康复手法分析以及对象患者需要的动作范围和动作速度设定的。

表 9.1 TEM LX2 的使用说明

项目			说明
治疗的动作			被动运动 伸展运动
设定项目	治疗模式		从 6 种模式(参照下面的功能说明·动作模式)中选取
	治疗条件		下肢各关节动作的角度、动作的角速度、停止时间
	治疗时间		最长 6h
安全设计	各种监测功能		通过监视发现过载荷、超过最大速度及动作范围停止的功能
	防止夹伤		通过手臂表面的接触传感器停止的功能
	停止操作开关		通过紧急停止开关(在操作面板的上部)停止的功能 有选择地启动患者停止开关
	远程监视		通过治疗中的远程监视停止的功能
功能说明	适用对象	症状	因脑血栓等心脑血管等疾病,造成意识障碍和身体障碍的患者、整形治疗的患者、高龄人群
		身高	140～180cm(推荐)
		体重	80kg 以下(推荐)
	关节活动范围(扇形区域)		股关节:屈膝时 10°～100°,SLR[1]时 10°～60° 膝关节:10°～100°(CPM[2]时 0°～140°) 踝关节:脚背 30°～脚底 45°
	最大关节角速度		股关节:屈膝时 24°/s,SLR[1]时 15°/s 膝关节:CPM[2]时 20°/s 踝关节:20°/s
	动作模式		① 3 关节 1:保持小腿基本水平,股、膝、踝 3 个关节同时运动(踝关节的力度可以设定) ② 3 关节 2:保持小腿基本水平,股、膝、踝 3 个关节同时运动 ③ 踝关节:只有踝关节运动 ④ CPM[2]:保持脚踝位置不动,膝关节屈伸运动 ⑤ SLR[1]:膝关节伸展位置,股关节和踝关节运动 ⑥ 复合:将①～⑤的两种不同动作模式组合

续表 9.1

项　目		说　明
本体规格	尺寸	540mm(*W*)×833mm(*D*)×1250mm(*H*)
	质量	约 98 kg
	电源	AC 100V(±10%)50/60 Hz
	电源输出	260 V·A
	输入显示装置	6.5in 带触摸屏的液晶显示器
使用标准		JIS T 0601-1(医疗用电器　关于安全使用的一般要求事项) JIS T 0601-1-2(医疗用电器　电磁相容性——要求事项及其试验)

1)Straight Leg Raising:直腿运动。

2)Continuous Passive Motion:连续的被动运动。

简洁的设计

TEM LX2 的主要使用场所是急性期治疗的现场——**重症治疗室**(ICU:Intensive Care Unit)和脑出血急性期重症治疗室(SCU:Stroke Care Unit)、急性期病房等的床边,因此,设计尽量追求简洁。

重症治疗室

如图 9.5 所示,机器人手臂由 4 个轴构成,即为了能够将整个下肢的位置控制在扇形面(包括直进时的前、后轴)内的 2 个轴(J1 轴、J2 轴)、控制小腿姿态的 1 个轴(J3 轴)、控制踝关节动作的 1 个轴(J4 轴)。手臂的前端设置可分别保持小腿和足部的姿态,与理疗时徒手支持小腿相同。各轴

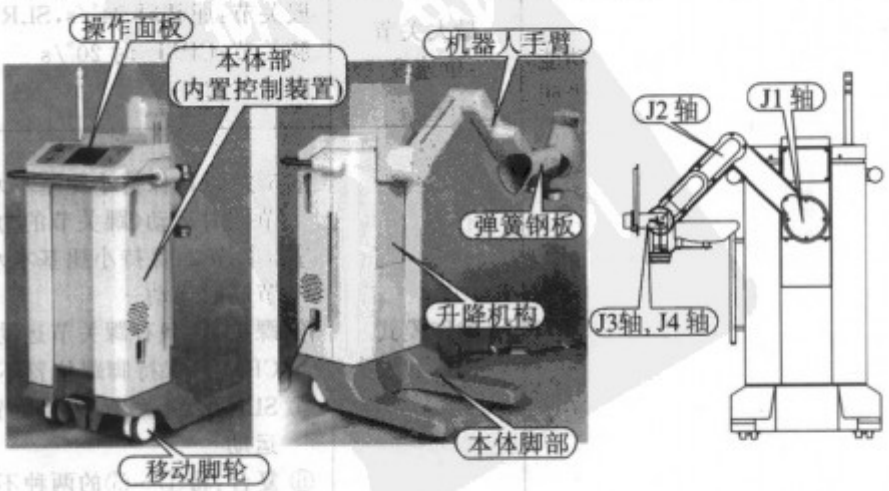


图 9.5　TEM LX2 的构造

由交流伺服电机驱动，驱动电机上安装了可靠性较高的光学编码器。电机尽量配置在本体内部，由于驱动力是从手臂内传递的力矩，所以，手臂要由重量轻的细管制作。

控制装置是操作面板、模块化的伺服放大器和电源等一体化结构。为了节省配线和空间，操作面板采用安装了带触摸屏的液晶显示器。

提高操作性能

要求医生和护士等医疗工作人员的操作能够设定成直接且能准确判断的治疗模式，因此，采用由图形和文字构成的菜单操作方式。

图 9.6 所示为操作流程和菜单画面。设置的患者小腿长度和治疗模式(见图 9.7)等数据由控制装置内的存储器记忆，正常使用 2 次以后，只需选择患者的名字就可以进行治疗，操作非常简单。下肢运动时各关节角度、屈伸时在扇形面内的平均力是作为治疗结果记忆的，可以将这些信息作为治疗改善过程提供给患者，起到激励患者治疗信心的作用。



图 9.6 操作流程和菜单画面

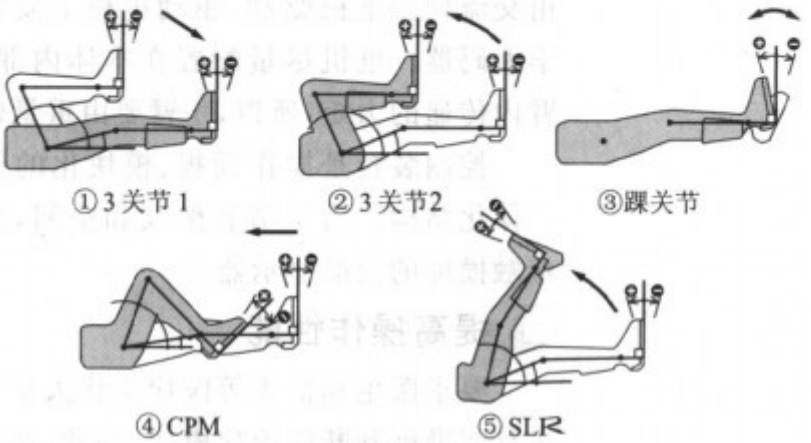


图 9.7　治疗模式

安全设计

TEM LX2 符合安全标准 JIS T 0601-1(医疗用电器关于安全使用的一般要求事项)和 JIS T 0601-1-2(医疗用电器电磁分离——要求事项及其试验),这是设计下肢功能恢复训练机器人基本的安全条件。在此基础上根据 **FTA**(Fault Tree Analysis)、**FMEA**(Failure Modes and Effects Analysis)及安全影响评价,设计中又加入了安全功能。具体的**安全措施**如下。

FTA
FMEA
安全措施

双保险

① 为了防止患者和操作者触电,采取了**双保险**的安全措施。即进行基本的基础绝缘和接地保护两种方法,万一基础绝缘破损时也不会被电击伤。

② 采用了原来用于工业机器人的电机转矩指令和监测电机的反馈脉冲,能够检测出过载和速度异常等情况。

③ 设计了“防止夹伤功能”,如果在工作中接触到手臂,接触传感器检测到后就会自动停止。

④ 设计了“防止过载功能”,当患者随意动作时,机器人的手臂就会轻柔地动作,减小对患者施加的力度,防止患者受伤。

⑤ 设计了“脱离装置检测功能”,当患者完全脱离装置时,机器人的手臂就会停止动作。

⑥ 设计了异常情况处理功能,位置检测部分设计了计数器和 CPU 两道关口,用于比较相对位置和速度,如果超过了设定值,就会作为异常情况处理,将机器人手臂的电源断开。如图 9.8 所示。

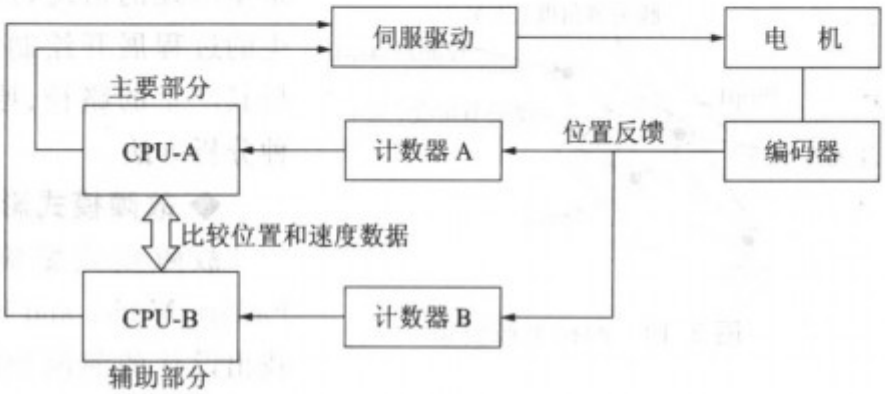


图 9.8 双保险系统

安全措施是设计下肢功能恢复训练机器人中最重要的一项。从患者的角度出发，必须提供安全和安心的治疗条件。

相关知识

◆ 下肢运动控制方面的注意事项

图 9.9 是用连杆来模拟机器人支承人的下肢并运动的机构。整个机构是分别以机器人的基轴和人的股关节转轴为原点固定的封闭连杆结构。机器人的关节为主动轴，带动从动轴——人的股关节和膝关节动作。这时，必须注意到由于受到人腿的长度和关节活动范围的限制，需要将机器人控制点的位置和姿态控制在一定的范围内。如图 9.10 所示，当机器人的控制点为(x_1, y_1)时，作为控制对象的人的下肢姿态理论上有 Prop1(实线)和 Prop2(虚线)两种。但是，由于人膝关节的角度不可能为负值，所以必须要选择 Prop1。



图 9.9 由机器人进行下肢运动机构的模式

◆ 故障的拓扑分析

故障的拓扑分析(FTA：Fault Tree Analysis)对于可靠性或安全性方面不

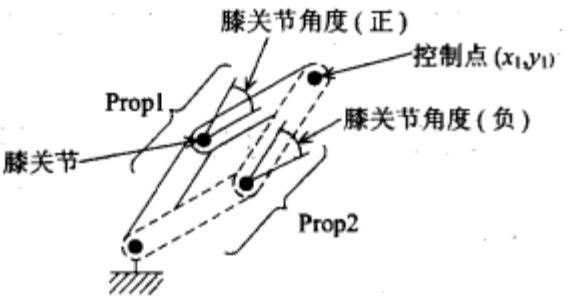


图 9.10　两种下肢姿态

希望出现的情况，用逻辑符号将其产生的过程展开绘制成拓扑图，由此分析其产生的路径、原因及其概率的一种分析方法。

◆ 故障模式影响的分析

故障模式影响的分析(FMEA：Failure Modes and Effects Analysis)能找出设计的漏洞和隐藏的缺陷，分析构成要素的故障模式及对其上一项目影响的一种分析方法*。

◆ 危险影响评价

对于可预见到的危险，能事先作出其危险程度的评价，并根据评价制定出相应措施的处理方法。

题外话

医疗电器的安全标准

关于医疗用电器的安全，国际标准包括 IEC 60601-1(1988)、其补充 1(Amendment 1)(1993)、补充 2(Amendment 2)(1995)和 JIS T 0601-1(医疗用电器　第1部分：关于安全使用的一般要求事项)是关于安全的基本标准，是所有的医疗用电器都必须遵守的。

标准的适用范围是"规定了关于医疗用电器安全方面的一般事项，并且个别标准给出了安全方面的基本要求"，标准是针对所有的医疗用电器，保证其基本安全性的手段。其他方面还涉及机械的安全、热的安全、可燃性气体的安全及异常动作时的安全等。尤其是对影响到患者的生命和触电(电击)方面的电气安全制定了详细的规定。

2002 年，以 IEC 60601-1-2 为基础制定了关于电磁相容性的标准 JIS T 0601-1-2(电磁相容性——要求事项及其试验)。

关于危险性影响评价，也随着 2005 年药事法的修改，以 ISO 13485：2003 为基础的质量管理系统已被认证。

*：财团法人日本科学技术联盟(http://www.juse.or.jp/index.html)。

3 双足步行机器人

要 点

对于双足步行机器人，如果限定了使用范围，并采用运算量最小的自由度和软件构成，就能够很容易地用速度较低的微处理器组成。另外，其执行机构和连杆等机构，如果不使用最先进的特殊产品，而是采用传统的技术和零件，通过优化组合就能够以较低的成本构组。

解 释

硬件的构成

小型双足步行机器人 Silf-H2 是由脚部、腕部和头部等共计 21 自由度的关节，以及 CCD 拍照模块、无线模块组成的**人形机器人**。其主要在娱乐领域中应用，所以尽量追求拟人的动作表现、小型轻量化和低成本。图 9.11 所示为机器人的外观，表 9.2 所示为其规格。

人形机器人

关节的自由度 关节的自由度如图 9.12 所示。设计脚部和腕部的自由度是对生成双足步行机器人轨迹的难易度影响较大的重要设计项目之一。设计中采用了能够比较容易实现的目标步态和动作，其构成易于**逆运动学**的分析。

逆运动学

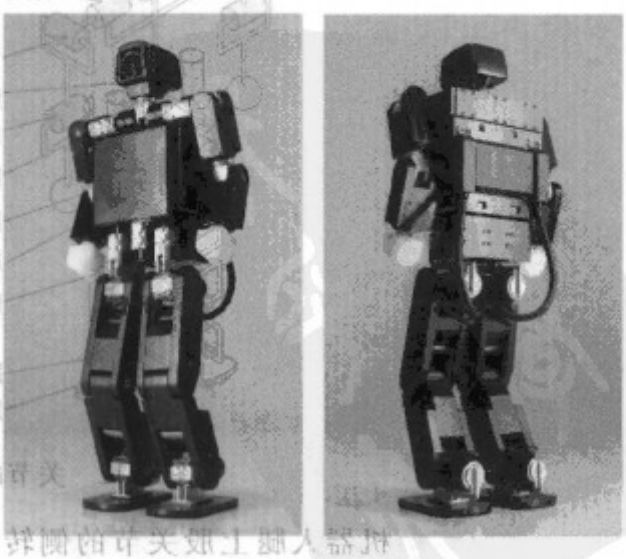


图 9.11 Silf-H2 的外观

表 9.2　Silf-H2 的规格

项　目		规　格
尺寸	高度	252 mm
	宽度	95 mm
	厚度	50 mm
质量		730 g
自由度	脚部	6 自由度×2
	腕部	3 自由度×2
	头部	2 自由度
	腰部	1 自由度
电机		DC 无心电机×21 个
传感器	关节角度	电位器×21 个
	图像	10 万像素 CCD
电池		Ni-MH (7.2V,2150mA·h)

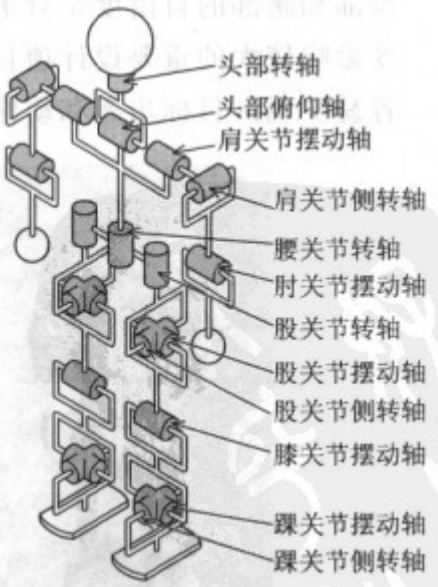


图 9.12　关节的自由度

机器人腿上股关节的侧转轴和摆动轴距离躯干最近，是按侧转轴和摆动轴的顺序进行连接。按此顺序连接时，如果机器人由直立状态侧转 90°，则分开两腿后，要向前方

摆动时，只要使摆动轴转 90°即可。但是，如果机器人由直立状态使摆动轴转 90°，则向前方摆动后，要分开两腿移动时，需要使侧转轴转 90°后摆动轴再转 90°，所以很难实现敏捷地动作。

操作性
可操作性
配置设计

由这一关节的连接顺序可以发现，它对**操作性**有较大的影响，决定了动作的自如与否。因此，从**可操作性**的角度出发，在进行**配置设计**时应将容易实现的动作优先考虑。另外，在作腿的逆运动学分析时，如果以从股关节中心到膝关节中心的长度与从膝关节中心到脚踝关节中心的长度相等，连接各关节中心为等腰三角形入手，就能很容易地求得从股关节中心到脚踝关节中心的距离为等腰三角形的底边长度。因此，采用逆运动学的求解比较简单。

执行模块 使用执行元件的关节时，由于各自所需要转矩的转速不同，开发使用了 4 种不同特性的模块。图 9.13所示为各种执行模块的外观。

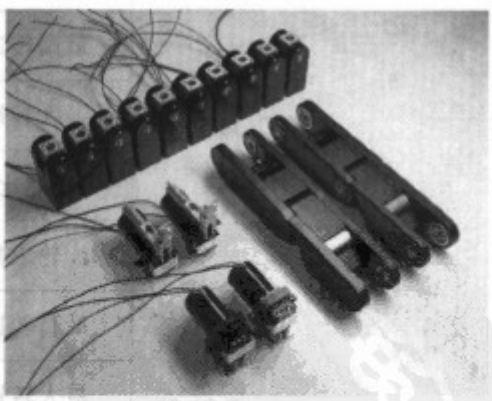


图 9.13 各种执行模块的外观

上半身的执行元件只显示动作，不需要看到是如何动作的，所以设计时选择了小转矩、高转速。由于下半身的执行元件需要支撑机器人的体重，所以，设计时选择了大转矩。特别是股关节的侧转轴和摆动轴以及膝关节的摆动轴承受的载荷较大，因此必须保证其执行元件的输出转矩是其他执行元件的一倍。另外，机器人还需要高速度地步行和跳跃，所以，股关节和膝关节的各摆动轴要具有较高的转速。

间隙

设计执行元件时，需要特别注意减小减速机构的**间隙**。

减小减速机构的间隙可提高响应性能，角度控制也比较容易。对于这种执行机构，如果使用价格最低的直齿轮减速机构，为减小机构的间隙，在设计时就应按以下的配置进行选择(见表 9.3 和图 9.14)。

① 尽可能地提高最后一级的齿轮减速比。

② 支承各齿轮的轴不应发生弯曲，应是粗而短的轴。

③ 齿轮模数尽可能小。

④ 尽量降低齿轮的级数。

表 9.3 执行元件的规格

项 目		规 格
上半身用	最高转速	230r/min
	最大转矩	15.7N·cm
	减速比	1/128.6
	齿轮级数	3 级
脚部用之一	最高转速	250r/min
	最大转矩	53.9N·cm
	减速比	1/118.4
	齿轮级数	3 级
脚部用之二	最高转速	220r/min
	最大转矩	34.3N·cm
	减速比	1/118.4
	齿轮级数	3 级
脚部用之三	最高转速	210r/min
	最大转矩	15.7N·cm
	减速比	1/141.4
	齿轮级数	4 级



图 9.14 执行元件的内部

当机器人的关节要承受冲击时，硬接触容易破坏。因此，要保证执行机构的柔性，应具有较好的**后运转性能**。在设计时按以下的配置进行选择，能够保证后运转性能良好。

后运转性能

① 选择使用转子转动惯性较小的电机。

② 尽量降低减速比。

③ 不使用蜗轮蜗杆等摩擦损失较大的传动机构。

按上述要求设计的执行机构主要有两种类型。其一是直径大、转矩大、转速低的 AC 电机与减速比较小的减速器组合，是接近直接传动的类型；其二是转子转动惯量极小的杯型无心 DC 电机与减速比很大的减速器组合的类型。最终应根据机器人的大小、可靠性和成本等选择执行机构的类型。因为机器人 Silf-H2 要求小型化和低成本，所以选择了后一种类型。

除了使用上述机构保证执行机构的柔性以外，还可以采取使用转矩传感器进行**柔性控制**的方法。

柔性控制

控制回路的构成

控制回路的构成与机器人的传感器、可靠性、维护性及成本等因素有关，根据侧重点的不同，回路的构成也大不相同，所以这是重要的设计项目之一。

分散控制 制造大型的、需要可靠性和维护性能好的机器人通常采用分散控制。分散控制是将一个执行元件或一条腿作为一个模块处理，由安装的微处理器等进行局部的伺服控制。所有的模块都通过高速串行通道与中央处理

器连接，进行统一控制。

中央集中控制　小型的、要求低成本且运动性能好的机器人通常采用中央集中控制。中央集中控制是将所有的执行元件都与中央处理器连接，所有的控制均在中央处理器内部进行。因此，无需通过串行通路等进行通信，就能够使控制的时间延迟达到最小。另外，由于在手脚上不安装控制回路，就能够构成细长而且质轻的手脚，因此提高了手脚的运动性能。

机器人 Silf-H2 分别吸取了分散控制和中央集中控制的优点，是由介于两者之间的控制构成，其控制回路构成如图 9.15 所示。

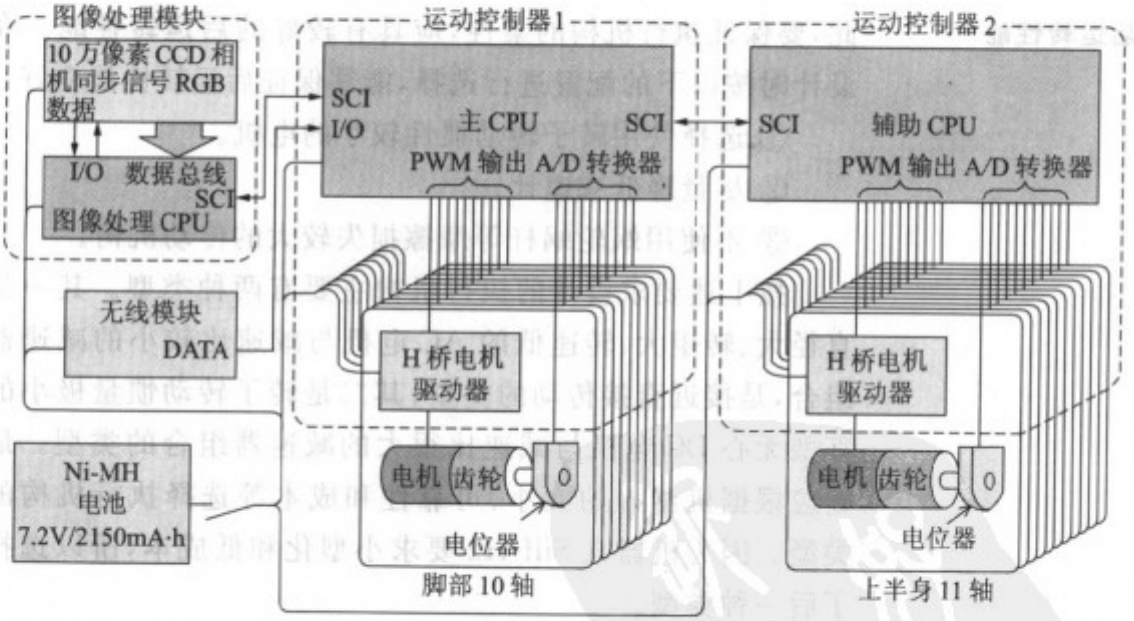


图 9.15　控制回路的构成

这种控制是由运动控制器 1 控制腿部的执行元件，由运动控制器 2 控制上半身的执行元件。运动控制器 1 的微处理器是协调整体的主处理器，其他部分的微处理器与串行通路连接。控制各执行元件时，通过从微处理器发出的 PWM 信号控制 **H 桥电机驱动器**，驱动 DC 电机在四种状态（正转、反转、堵转、短路制动）中高速切换（如果能够很好地使用堵转和短路制动，就可以控制关节的黏性使之具有柔性，并能够降低耗电量）。

H 桥电机驱动器

DC 电机的输出通过减速器传递给关节，使用**电位器**测

电位器

量关节的角度。由于电位器输出的角度值是电压，所以，要经过 A/D 转换器数字化后输入到微处理器中。

图像处理模块是将从 10 万像素的 CCD 相机输出的图像数据，直接装入微处理器的存储器中，进行图像处理。

对于自律型双足步行机器人，电池是影响其运动性能的极其重要的因素。选用高能量的电池，不仅要小型化、轻量化，而且要求电池的内部电阻小、放电特性好，能够在剧烈动作时产生大电流。机器人 Silf-H2 采用了放电特性好的**镍氢电池**。

镍氢电池

软件的构成

双足步行机器人的控制必须使非常多的执行元件协调动作，要求进行统一的控制。因此，要将软件分成若干级，并将从上一级输入的动作命令传递到下一级的过程进行详细分解，最终对每一个执行元件的角度进行控制。软件的构成如图 9.16 所示。

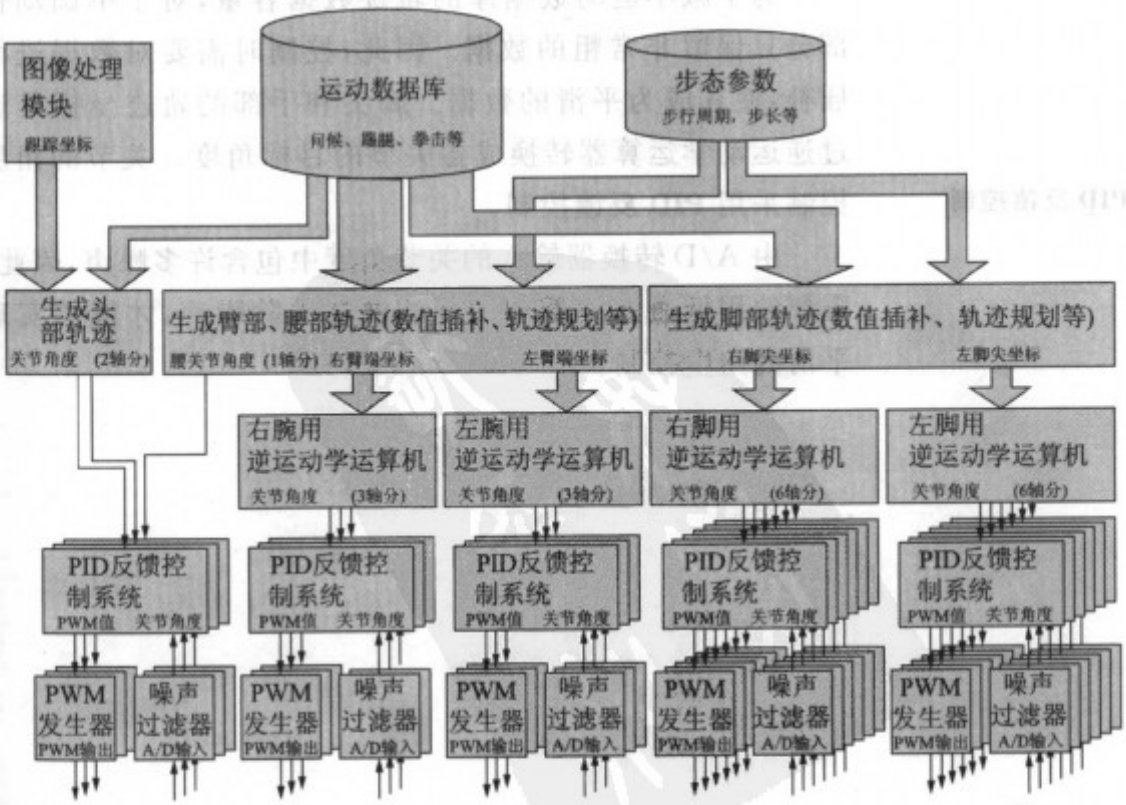


图 9.16 软件的构成

循环动作
单独动作

这种构成是将机器人的动作分成步行等**循环动作**以及问候、踢腿和拳击等**单独动作**，并对这些动作分别进行处理。对于循环动作，要事先设计好步行循环的周期和步长及加速度等步态参数，用这些参数生成脚部和腕部的轨迹。对于单独动作，要事先将脚部和腕部轨迹的数据系列制作成**运动数据库**。

运动数据库

在设计步态参数和运动数据库中的目标轨迹数据时，要保证机器人的动作稳定，不会摔倒。

目标 ZMP 跟踪控制 为了保证步行和动作稳定，控制常使用目标 ZMP 跟踪控制。所谓 **ZMP**（Zero Moment Point）是控制作用于机器人上的重力和因机器人加、减速而产生的惯性力的合力向量与地面的交点，使该交点处于足底与地面接触点形成的无界线的支承多边形的内侧，生成目标轨迹，并通过姿态传感器和足内传感器实时修正轨迹，以保证稳定的控制。

ZMP

为了减小运动数据库的轨迹数据容量，对于单调动作部分只保留非常粗的数据。因此，控制时需要对数据进行插补，使其成为平滑的数据。脚尖和手部的轨迹坐标是通过逆运动学运算器转换成各关节的目标角度。关节的角度控制采用 **PID 反馈控制**。

PID 反馈控制

由 A/D 转换器输入的关节角度中包含许多噪声，因此，需要使用低通滤波器和中间滤波器去除噪声，才能够实现平滑的角度控制。

4 警备机器人

要点

保安要在楼宇内等处巡逻或在一个位置上站立地进行工作，如果时间长了，对肉体和精神上都是一种负担。所以就有了对警备机器人的需求。

警备机器人是提供一种保安的服务，可以协助保安进行巡逻和向导工作。

解释

警备机器人

使用警备机器人的警备系统

警备机器人“卡通机器人 C4”在白天可以做收发、向导业务，夜晚进行巡逻监视业务。其主要规格如表 9.4 所示。

表 9.4 卡通机器人 C4 的主要规格

外形尺寸	640 mm(W)×710 mm(D)×1330 mm(H)
质　量	约 90 kg
速　度	0.5 m/s
爬坡能力	±5°
电　源	DC24V DC12V(25A·h)电池×2 个串联
连续行走时间	约 3h
充电时间	约 3h



图 9.17　卡通机器人 C4 的外观



图 9.18　警备系统的构成

警备机器人不可能具有与人类相同的能力，因此，警备机器人要进行固定的日常工作，需要承担具有人类随机应变的判断和处理的工作，与人合作进行工作，以提供高度的

保安服务

保安服务。使用警备机器人的警备系统的构成如图 9.18 所示。

警备系统

警备系统是由警备机器人、监视装置、充电装置和无线 LAN 构成。通过电梯控制装置和机器人监视装置的通信，警备机器人能够利用电梯在各楼层间移动。通常，在警备机器人上都设置了防火中心，机器人监视装置即使是在较

遥控监视装置

远的地方也可以通过网络等由**遥控监视装置**监视机器人。

卡通机器人 C4 可以根据事先输入的地图和路径，自动进行巡逻。警备机器人通过无线 LAN 通信，将从自己照相机得到的图像、周围的情况以及从各种传感器获得的信息发送给监视装置。监视装置中某一时刻的画面如图 9.19 所示。如果在巡逻中发现了异常情况，警备机器人就会向监视装置报警。当监视装置接收到报警信息时，在显示器上显示报警信号，并发出警报声通知保安人员有异常情况发生。保安人员根据机器人拍摄的图像和传感器的信息掌握周围的情况，通知其他保安人员到现场快速进行适当的处理。

当机器人在巡逻的路上遇到障碍物等不能够继续行进时，障碍物对机器人自身也是一种异常情况，所以机器人就会向监视装置发送报警信号，要求保安人员来进行处理。

巡逻结束后，机器人会自动与充电装置对接，开始充

自动充电功能

电。由于机器人具有**自动充电功能**，所以，不必麻烦保安人员或其他技术人员，便能够 24h 连续使用。

向导机器人

在白天不需要巡逻的时间内，可以**作为向导机器人**使用，**提供**对各种设施的向导服务等。利用机器人身上安装

自律移动功能

的**触摸屏**能够进行设施向导（见图 9.20），使用**自律移动功能**则能够进行引导工作。根据事先输入的内容不同，有许多使用方法，例如，在商业设施等场所，可以显示店内的最新信息、饭店的菜单、会场的信息等。

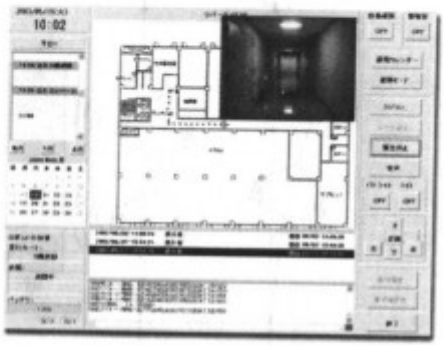


图 9.19 监视装置中某一时刻的画面



图 9.20 向导的画面

卡通机器人 C4

卡通机器人 C4 自律移动部分的构成如图 9.21 所示。

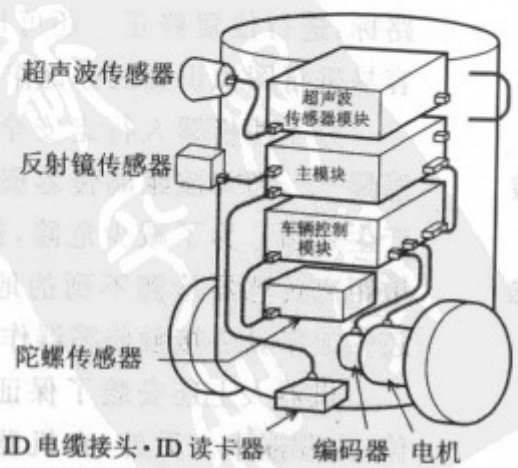


图 9.21 自律移动部分的构成

自律行走

C4 是按照记忆的路线**自律行走**。当前的位置需要使用由与电机相连的编码器计算驱动轮的累积距离信息和光纤陀螺的角度信息进行计算。这样计算出来的位置信息，在

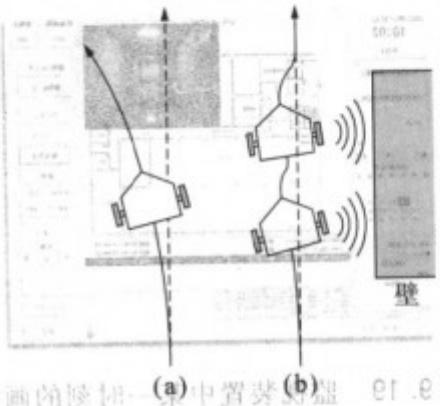


图 9.22 位置修正

行进路线较长时会产生积累误差(见图 9.22(a))。修正积累误差时,需要使用外界传感器来识别环境中的路标,通过与地图上记载的路标模型进行比较,推算出准确的位置。C4 在修正位置信息的积累误差时,能够使用多种路标。例如,用超声波传感器检测到墙壁的距离,再与机器人自己的地图比较的方法;根据在行走路线上配置的非接触式的 ID 特征来识别位置的方法;将天花板上的日光灯等光源作为图像识别的方法等。

以利用墙壁作为路标为例说明修正位置的方法。假设使用机器人的环境是办公大楼,走廊等平整墙壁是比较理想的路标。外部传感器使用超声波传感器,用来检测机器人到环境中平整墙壁的距离,与事先输入的机器人的路径到墙壁的距离比较后,修正当前位置(见图 9.22(b))。

但是,机器人实际进行警备工作时,在空间较大的大厅和墙壁上,常会因摆放了物品而破坏了修正位置所需要的墙壁。这时,也可以将非接触式的 ID 特征和 ID 卡片作为路标,进行位置修正。还可以将天花板的日光灯和张贴着容易进行图像识别的标记作为路标,进行位置修正。

超声波距离传感器
光敏距离传感器

为了使机器人行走安全,配置检测人体和障碍物的传感器——**超声波距离传感器**和**光敏距离传感器**时,不能够产生死角。为了减少危险,使其在超声波距离传感器和光敏距离传感器检测不到的地方也能够停止,机器人的四周还安装了具有接触传感器作用的缓冲器。

机器人上还安装了保证安全用的传感器,用于检测人体、火和漏水。另外,在机器人的头上装有全景照相机,并将拍摄的图像用无线 LAN 发送到实时监控中心。机器人上安装的扬声器和话筒,可以使在监视装置旁的保安人员能够通过声音确认机器人的情况。

5 轮椅机器人

要　点

轮椅是腿有缺陷和高龄人重要的移动工具之一。随着老年化社会的到来，更安全舒适的“高智能轮椅”即将实用化。因此，近年来，进行轮椅的自动化和智能化的研究非常普遍。

解　释

IGVC

IGVC

IGVC 是 Intelligent Ground Vehicle Competition 的缩写。IGVC 是每年在美国举办的开发户外无人驾驶车的竞赛，主要以大学生和研究生的参赛队为对象，将竞赛作为课外学习的一个环节。由于是在户外环境中进行比赛，所以是一种技术难度较大的竞赛。竞赛根据计算机处理能力的提高、参赛队技能的提高，每年都要改变若干规则，但大体上是按表 9.5 中所列的三个竞技项目进行。

表 9.5　IGVC 的主要竞赛

竞技项目	竞技内容
Autonomous Challenge Competition(自律行走挑战赛)	在两条白线围着的场地中躲避障碍物行走的竞赛
Navigation Challenge Competition(导航挑战赛)	躲避障碍物并通过规定的多个地点的竞赛
Vehicle Design Competition(车辆创意竞赛)	将车辆的创意编写成设计报告，在规定的时间提交。在比赛的当天进行口头发表并要经过各种审查、评价的比赛

注：通过各自的任务进行竞赛。设计报告可以从 IGVC 主页(http://www.igve.org)下载，也可以参照已经翻译成日语的网页 http://www.ikko.k.hosei.ac.jp/rinko/index.html。

日本政法大学从 1996 年开始参加 IGVC，在 1997 年和 2002 年取得了主要的竞赛——自律行走挑战赛的冠军。轮椅型车辆从 2000 年开始出现在比赛场上。以下将要讲解的是 2002 年参加的自律行走挑战赛及导航挑战赛，并获得这两项冠军的**自律行走型轮椅机器人**。

自律行走型轮椅机器人

全景照相机

图 9.23 所示的自律行走型电动轮椅的特点：装备了**全景照相机**；装备了激光雷达，可以检测出前方 180°范围内的障碍物并计算出距离。全景照相机主要用于识别白线，而激光雷达则主要是检测障碍物。

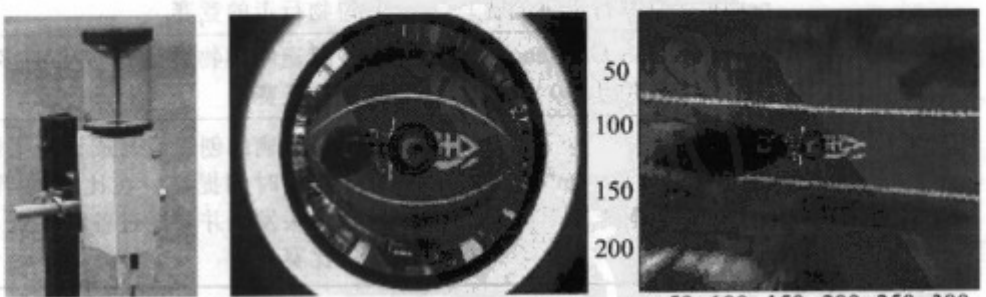


图 9.23　AMIGO 2002

相关知识

◆ 全景照相机

这是利用球面反射镜可以一次拍摄 360°图像的照相机。特别是反射镜的形状是双曲面时，能够很容易地将全景照相机的图像转换成为普通照相机的图像，参见图 9.24。



(a) 照相机　(b) 镜头中的图像　(c) 平面复原图像

图 9.24　全景照相机

◆ 轮椅机器人传感器的构成

图 9.25 是机器人读出和识别外界环境，进行自律行走的方框图。机器人读出的所有信息全部装入笔记本电脑，根据这些信息来识别周围的情况。通过识别的结果来决定控制的角度和速度，经过 D/A 转换器的转换，接通电动轮

椅的控制回路，使车辆运动。机器人在自律行走过程中，为了防止发生计算机的错误判断等情况，从安全方面考虑，设计了两套紧急停止装置，即通过无线发射器发送停止信号的方法和手动按钮停止的方法。

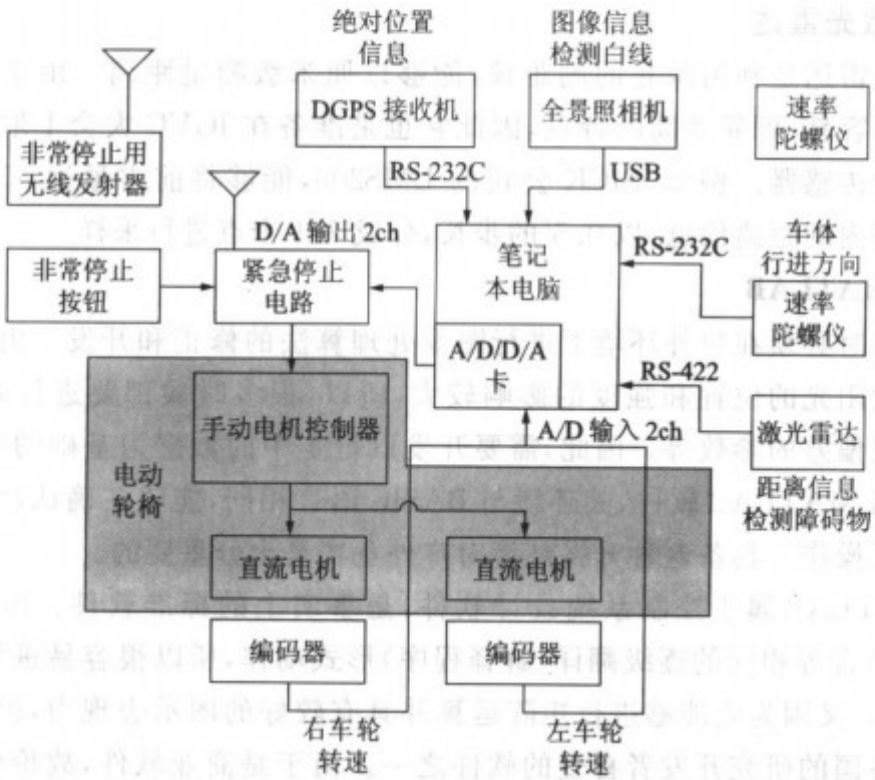


图 9.25 轮椅机器人构成方框图

◆ DGPS

DGPS 是 Differential GPS 的缩写，是将发送所有位置信息的基准站发送的 GPS 卫星的位置信息，与 GPS 卫星直接发送的位置信息进行差分处理，去除同相噪声，以提高位置测量的精度。如果只使用 GPS 测量位置，就会有 10 m 的误差，而使用 DGPS 测量位置，可将误差减小到 5m。在日本，汽车利用 FM 发送电波进行定位的方法已经实用化。此外，也有船舶用中波的服务，比较有名的还有利用同步卫星供飞机等高速移动物体使用的 WAAS(Wide Area Augmentation System)等。另外，由于在美国不能使用 FM 发送 DGPS 信息，所以比赛时推荐使用船舶用的中波或 WAAS。

◆ 速率陀螺传感器

速率陀螺传感器是能够测量角速度的传感器。使用这种传感器通过输出积分就能够测量出角度。虽然使用 DGPS 能够测量位置，但却不能事先获得将要行进的方向。因此，使用速率陀螺传感器来测量其行进方向的角度，通过积分可以计算出由初始位置向前方行进的角度。

◆ **RS-422**

RS-422是与RS-232C相同的串行通信标准之一，但RS-422能够比RS-232C更高速、远距离地传送数据。

◆ **激光雷达**

激光雷达是利用激光的测距仪，能够以厘米级测量距离。由于它具有检测障碍物容易、可靠性高的特点，因此它也是准备在IGVC大会上取得好名次所必备的传感器。例如，SICK公司的LMS200，能够将前方最远80m、180°的角度范围内的距离信息，以0.5°的步长，分成361个点进行采样。

◆ **MATLAB**

比赛时必须在户外环境下进行图像处理算法的修正和开发。由于户外的光线受太阳光的位置和强度的影响较大，所以，很多时候都要进行修正操作，调整出现偏差的参数等。因此，需要开发以行走中的数据为基础的模拟器等。如果使用MATLAB软件，其环境与BASIC语言相同，能够在确认动作的同时进行修正操作。具备这种开发环境对户外竞赛是十分重要的。

MATLAB属于控制系统设计软件，是事实上的标准软件。因为是用与BASIC语言等相同的逐级翻译(解释程序)形式动作，所以很容易进行修正(调试)操作。又因为它能够进行矩阵运算并具有较好的图示表现力，因此已成为受世界各国的研究开发者喜爱的软件之一。由于是商业软件，故价位比较高，目前又出现了模仿其语法的免费软件(库仑软件)有SCILAB和Octave等。

◆ **通过图像处理识别白线**

自律行走要求图像处理具有实时性，即处理时间不能够太长。由于是在移动的同时进行图像检测，所以，照相机上的污迹等问题使稳定测量比较困难。在这种干扰较多的情况下，检测直线的实用算法是Hough变换。

◆ **Hough变换**

Hough变换是抗干扰的直线检测算法之一。由于是一种以统计积分操作为基础的算法，所以实用性较强。直线Hough变换的定义(见图9.26)为

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta$$

使用上面的关系式，将用x-y坐标表示的数据转换成ρ-θ坐标。这时，用x-y坐标表示的点的数据不应与ρ-θ坐标点一一对应，而是一对曲线关系。这种判别方法是给定在ρ-θ空间"增量"，然后对其所对应ρ-θ空间的"增量"投票(voting)，最后选择"增量"票数多的直线。由于它是一种以统计积分操作为基础的算法，所以，具有非常强的抗干扰特性，处理速度较快，这还要根据ρ-θ空间"增量"的大小(分辨率)和图像尺寸的不同而异，是实用的图像处理算法之

一。它不仅可以检测直线，通过参量空间的变换，也适用于检测圆和其他形状的物体(见图 9.27)。

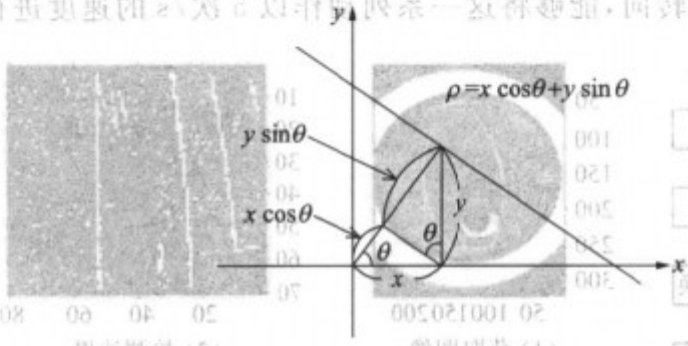
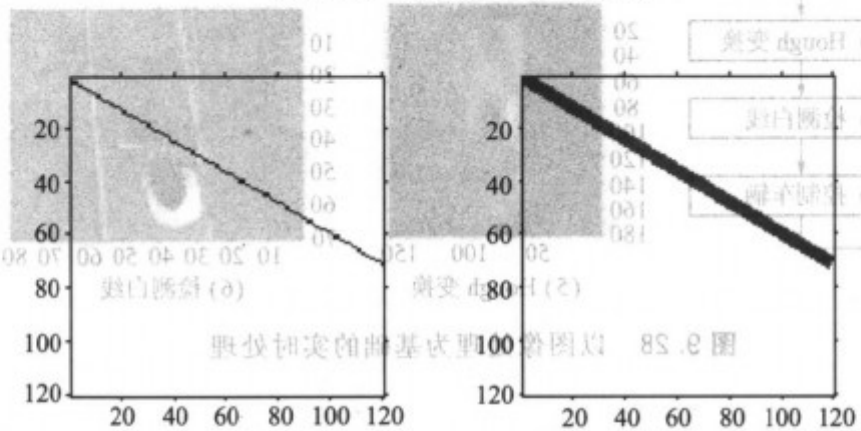
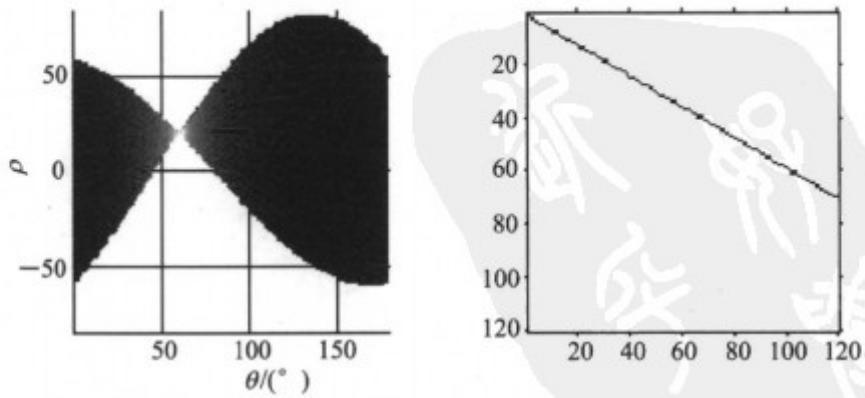


图 9.26 Hough 变换的定义



(a) 原图像 (ρ=20, θ=60°)　　(b) 与现在的图像重合



(c) 在Hough空间的映射　　(d) 逆Hough变换结果 (ρ=19.799, θ=60°)

图 9.27 使用 Hough 变换的直线检测和使用逆 Hough 变换推测的直线

◆ 图像处理的应用

由于使用笔记本电脑需要进行实时图像处理(见图 9.28)，但获取图像不需使用高价位的视频捕捉卡，而是采用 PCMCIA 型或 UBS 型的视频捕捉卡获

取图像并进行处理。使用在 MATLAB 上动作的 vcapg 能够快速地处理获取的图像，从获取图像到检测出边界、平面变换、数字化、Hough 变换、检测出航线及控制车辆的速度和转向，能够将这一系列动作以 5 次/s 的速度进行处理。

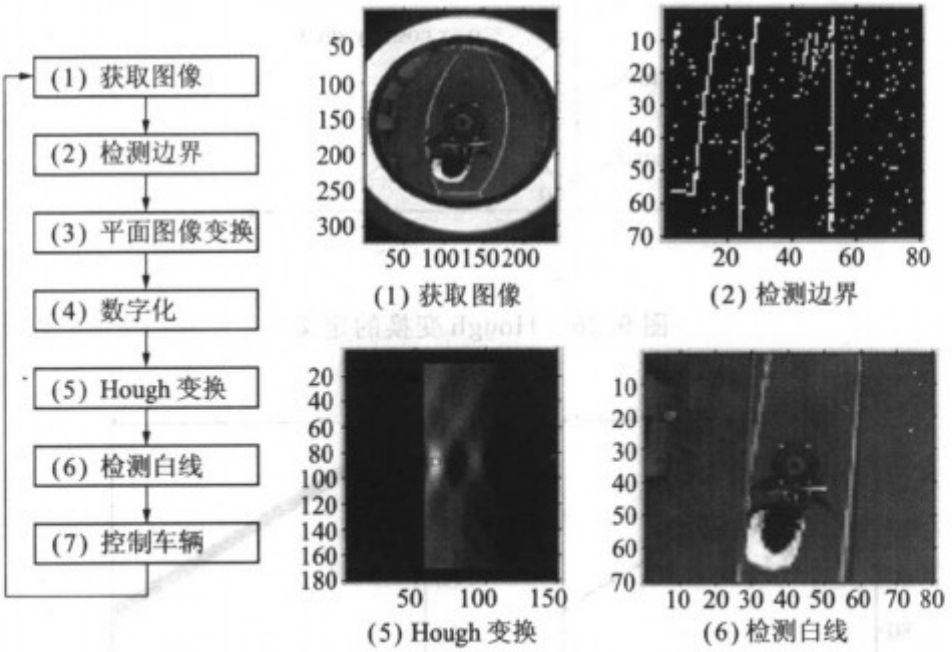


图 9.28　以图像处理为基础的实时处理

6 高速目标跟踪系统

要 点

使用由视觉得到的视觉信息控制机器人系统时，检测对象除了静止的物体以外，还必须要识别移动的物体以及随时间的变化而改变形状的物体。因此，对于机器人的视觉，必须要具备能够从随时间变化的动态图像系列中，实时地抽取要跟踪的检测对象的能力。

这种将动态的检测对象通过视觉等信息跟踪并识别的方法称为目标跟踪。本节将简要地介绍具有 2 自由度视线移动机构的高速目标跟踪系统。

解 释

活动视觉

人类在进行视觉识别时，需要将检测对象置于视野的中心，然后控制视线的方向。将模拟人类眼球的运动，通过机构控制照相机视线方向的系统叫做**活动视觉**。

活动视觉

移动视线的优点是能够高精度地检测出在较大范围内运动的对象。由于在人类视网膜的中心——中心窝处的视觉细胞的密度较高，所以人类视觉的特点是识别精度高。而对于普通的视觉，在像素密度一定时，是得不到相同效果的，视野中心的优点是光学特性好。

高速目标跟踪系统

因为活动视觉是使用照相机的图像信息进行视线方向控制，所以要求图像处理能够实时、高速地进行。通常，图像传感器使用 CCD 相机，它仅以帧频率为 30Hz 的视频信号输出图像，故提高处理速度比较困难。

由经验可知，为了将活动视觉的分度机构进行反馈控制，控制的循环时间必须在 1kHz 以上。为了解决这一问题，人们开发出能够以 1kHz 处理图像的**高速目标跟踪系统**。图 9.29 和图 9.30 分别是该系统的照片和构成，表 9.6 所示为该系统的性能参数。

高速目标跟踪系统



图 9.29 高速目标跟踪系统的外观

表 9.6 高速目标跟踪系统的性能参数

高速视觉 CPV-Ⅱ（浜松光产业制）	摄像头	传感器	CMOS 图像传感器
		像素	128×128
		灰度	8 bit
		质量	190 g
	处理部分	并行处理型	SIMD 型并行处理
		像素	128×128
活动视觉机构	机构	自由度	2 自由度（转动和倾角）
		活动范围	倾角轴：180° 全方位转轴：360°
	执行元件 倾角轴：SGMPH-01B 全方位转轴：SGMPH-02B （安川电机制造）	电机	DC 无刷电机
		额定功率	倾角轴：100 W 全方位转轴：200 W
		额定转矩	倾角轴：0.318 N·m 全方位转轴：0.637 N·m
		额定转速	3 000 r/min
		角度传感器	绝对值编码器
		角度分辨率	65 536 ppr（4 低倍时）
控制		处理速率	1 ms（1 个控制运算）
		控制方式	力矩控制

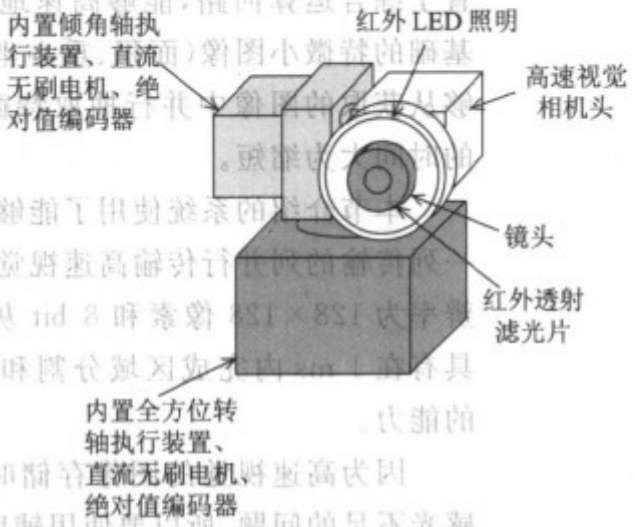


图 9.30 高速目标跟踪系统的构造

1 ms 高速视觉系统

通常，由于照相机处理速度慢，导致从照相机到图像处理装置的图像传输迟缓，以及在图像处理装置内的处理也缓慢。为了解决这一问题，设计了将 CMOS 图像传感器和并行处理电路统一的**超级视觉芯片结构程序**。

超级视觉芯片结构程序

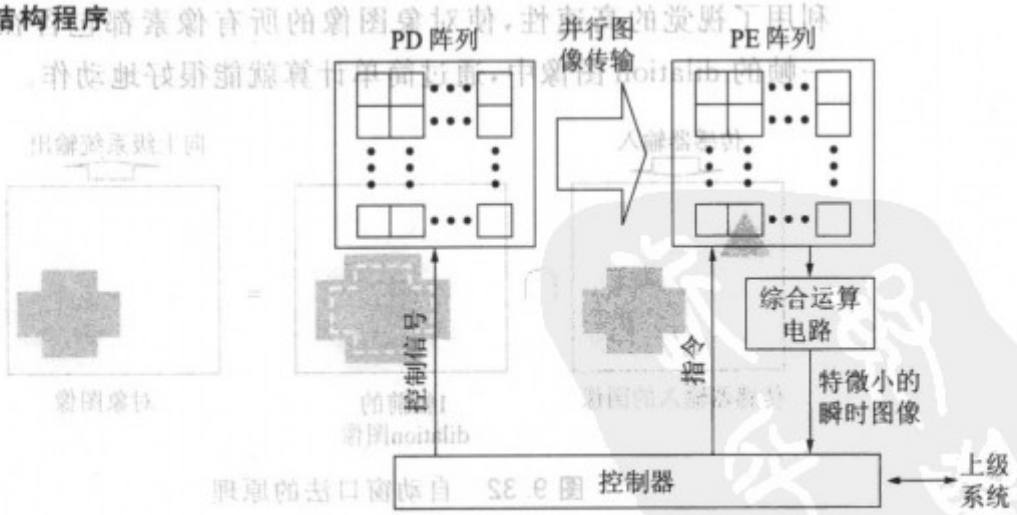


图 9.31 高速视觉系统的基本构成

图 9.31 所示为超级视觉芯片结构程序的简图。视觉芯片是将光检测部分的光检测器(PD)和处理部分的处理元件(PE)一体化的超级并行处理系统。是将所有的 PE 用一个命令驱动的 **SIMD**(Single Instruction/Multiple Data)**型电路**，各 PE 都能够与邻近上、下、左、右的 PE 通信。另外还设

SIMD 型电路

置了综合运算回路，能够高速地输出瞬时微量值和以它为基础的特微小图像（面积、重心坐标、主轴倾角等）。因为能够从获取的图像中并行抽取特微小图像，所以使图像处理的时间大为缩短。

本节介绍的系统使用了能够将从 PD 到 PE 的图像按每一列传输的列并行传输高速视觉系统（CPV-Ⅱ）。设置了分辨率为 128×128 像素和 8 bit 灰度的 CMOS 图像传感器，具有在 1 ms 内完成区域分割和瞬时检测等初始视觉处理的能力。

因为高速视觉的图像存储时间短，有在较暗的环境中感光不足的问题，所以要使用辅助光源——红外 LED 照明。将照相机的视线方向与照明光源的照射方向一致，可以提高照明的效果。

提取对象（自动窗口法）

dilation 图像

提取对象的方法使用自动窗口法。这是一种通过计算输入的图像与前一帧图像对象的 **dilation 图像**（使 1 像素膨胀的图像）的逻辑和来提取对象的算法，如图 9.32 所示。利用了视觉的高速性，使对象图像的所有像素都包含在前一帧的 dilation 图像中，通过简单计算就能很好地动作。



图 9.32　自动窗口法的原理

活动视觉机构

这是由绕水平轴线旋转的倾斜轴和绕垂直轴线的全方位旋转轴构成 2 自由度的机构，如图 9.33 所示。各轴由 DC 无刷电机直接驱动。因为不包括减速器，因此摩擦较小并能够平滑和高速度地转动，但是，需要使用比较大型的 DC 无刷电机提供较大的输出。另外，由于全方位旋转轴必须

能够带动倾斜轴和相机，所以输出应是倾斜轴的 2 倍。

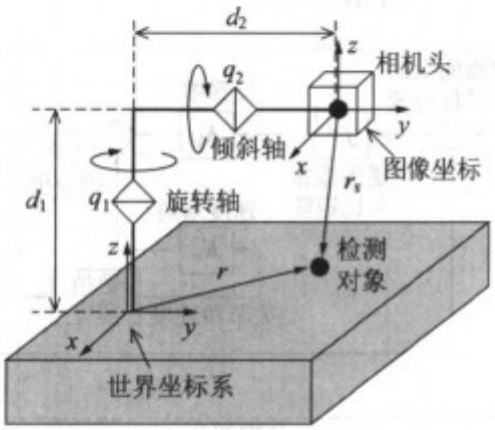


图 9.33 活动视觉机构简图

各轴安装的绝对值编码器用于测量关节角度和关节的角速度。本节介绍的活动视觉机构不包含减速器，黏性阻抗也非常小。因此，为了能够进行稳定的跟踪控制，必须有通过关节角速度反馈的制动，参见后文。将绝对值编码器的分辨率设置成每转 65 536 个脉冲的高分辨率，以提高关节角速度的测量精度。

为了能够承受高速运动，控制驱动只用电流控制方式，速度和位置的反馈控制都在上级处理系统中进行。由上级系统向控制驱动器发送的是力矩指令值。

视觉伺服控制系统

为了保持检测对象总在视野中心，可根据特微量基本视觉伺服法控制视线方向。特微量基本视觉伺服法是用图像坐标的特微量图像的误差进行反馈控制的方法，其特点是不需要推算对象的三维位置和形状就能够进行跟踪。

具体可用下面的式子计算。如果 $\boldsymbol{\tau}$ 为向控制驱动器发送的力矩指令值矢量，$\boldsymbol{m}$ 为用图像坐标对象的重心矢量，$\boldsymbol{m}_d$ 为重心目标值矢量，则有

$$\boldsymbol{\tau}=K_p\boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{m}_d-\boldsymbol{m})-K_v\dot{\boldsymbol{q}}$$

图像雅可比

其中，$\boldsymbol{J}$ 是被称为**图像雅可比**的矩阵，使特微量图像的变化与关节角度的变化建立起关系。K_p 是位置反馈增益，K_v 是速度反馈增益。由于该活动视觉具有良好的执行特性，所以通过这样简单的 PD 反馈就能够获得较好的性能。严格

地就必须补偿惯性矩和重力。其控制方框图如图 9.34 所示。

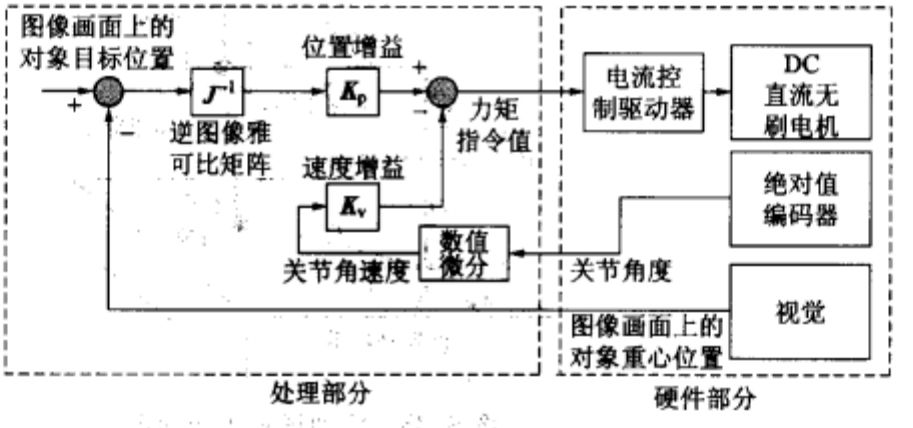


图 9.34　视觉伺服控制的方框图

图像雅可比的算法

在图 9.33 中，将在世界坐标系中的对象位置用齐次矢量 $\boldsymbol{r}=[r_x, r_y, r_z, 1]^{\mathrm{T}}$ 表示，从图像坐标系看到的位置用 $\boldsymbol{r}_s=[r_{sx}, r_{sy}, r_m, 1]^{\mathrm{T}}$ 表示。设倾斜轴的关节角为 q_1，全方位转轴的关节角为 q_2，则两者有以下关系：

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{T}_s\boldsymbol{r}_s$$

其中

$$\boldsymbol{T}_s=\begin{bmatrix}\cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0\\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & d_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos q_2 & 0 & -\sin q_2 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ -\sin q_2 & 0 & -\cos q_2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & d_2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

假设对象的动作十分小（$\dot{\boldsymbol{r}}_s=0$），将两边微分变形为

$$\dot{\boldsymbol{r}}_s=-\boldsymbol{T}_s^{-1}\left[\frac{\partial \boldsymbol{T}_s}{\partial q_1}, \frac{\partial \boldsymbol{T}_s}{\partial q_2}\right]\dot{\boldsymbol{q}}$$

其中，$\boldsymbol{q}=[q_1, q_2]^{\mathrm{T}}$。

当焦点距离为 f 的透视变换为 $\boldsymbol{m}=\dfrac{f}{r_{sz}}\begin{bmatrix}r_{sx}\\ r_{sy}\end{bmatrix}$ 时，图像面的对象重心变化与关节的角度关系可以写做 $\dot{\boldsymbol{m}}=\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}}$

当检测对象的距离较远时，图像雅可比近似为

$$\boldsymbol{J}\approx f\begin{bmatrix}\cos q_2 & 0\\ \dfrac{d_2}{r_{sz}}\sin q_2 & 1\end{bmatrix}$$

如果到视觉对象的距离远大于连杆长度 d_2 时，可以忽略左下角一项，图像雅可比就是对角阵。由此可知，保证图像中心与全方位转轴及倾斜轴轴线一致性的重要性。另外，当倾斜轴为 $\pm 90°$ 时，照相机处于直上和直下的特殊姿态。

巧妙操纵系统中的应用

高速目标跟踪系统是机器人的手臂与机械手的组合，是机器人控制的应用。图 9.35 所示的是通过两台目标跟踪系统，实时地对对象的三维位置和姿态进行计算，根据其结果准确地进行操作的高速巧妙的操纵系统，它实现了以前难以完成的高速动态的巧妙操纵。图 9.36 所示为抓取下落圆柱的连续照片；图 9.37 是通过视觉反馈击球的连续照片。

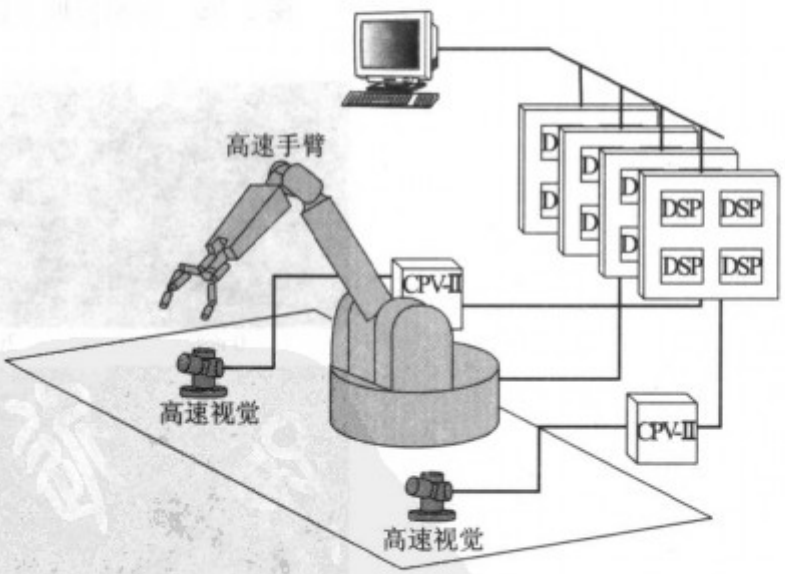


图 9.35 高速巧妙操纵系统

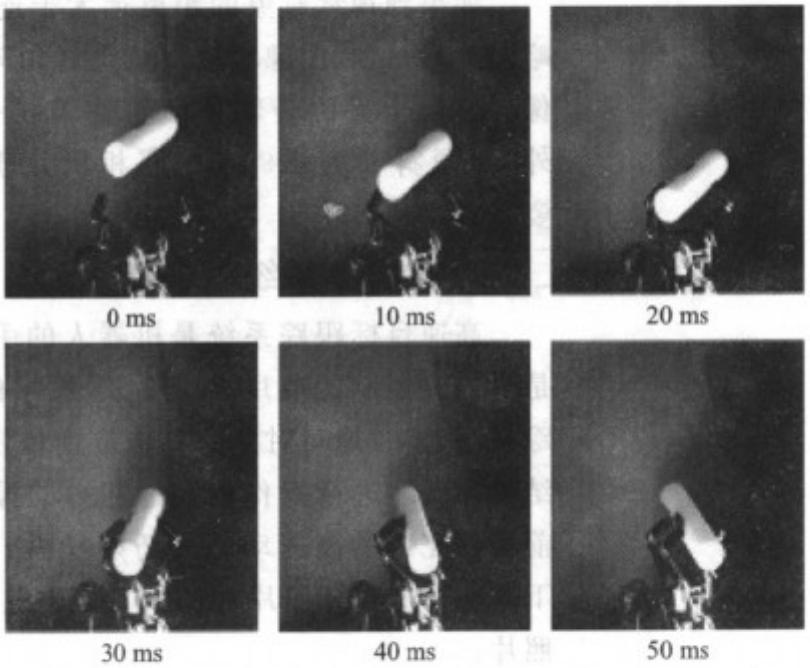


图 9.36　高速抓取下落圆柱

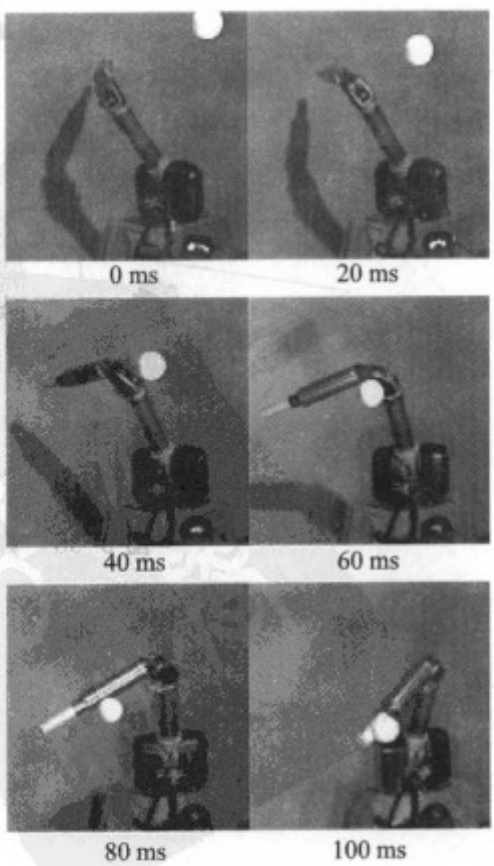


图 9.37　高速击球

篇外话

目标跟踪

除了机器人以外，在许多领域中都需要目标跟踪。如汽车上安装的为避免危险的自动驾驶技术、无人大楼等的可疑者的踪迹、通过检测人手动作的非接触的人机接口，除此之外，正在进行的应用研究还有许多。

7　自动剪票机

要　点

近十几年来自动剪票机迅速普及，最近，能够使用非接触 IC 卡的自动剪票机逐渐增多，但仍然以磁性车票的数量居多。现在磁性车票的种类很多，急需解决的是如何快速地通过机械处理判别车票的种类，以方便使用者，并降低维修费用。

因此，在通过自动剪票机时，安全准确地检测出乘客、提高磁性车票的识别精度和速度、通过改进机构降低成本，这些都是正在进行的研究。

解　释

自动剪票机的作用

出票和剪票系统

如果将**出票和剪票系统**比作打棒球，那么，售票机就是投手，车票是球，自动剪票机是接手。

但是，与打棒球相同，只有出票和剪票系统是不能够团队工作。对于乘坐精算机等各种机器的数据、卖钱额数据及维护数据等的上传和下载，则是通过后方处理器构成系统，进行团队作业。

这种系统在铁路中叫出票和剪票系统或站务系统（见图 9.38）。在出票和剪票系统中的自动剪票（系统）是团队中的一员，因近年来 IC 卡车票的应用，其作用显得越来越重要。

自动剪票系统的构成

自动剪票系统

自动剪票系统通常由自动剪票机本体、通道显示器、监视盘和数据累计器构成。在此主要说明自动剪票机本体。

自动剪票机

自动剪票机根据使用车票的种类、普通线用和新干线用及出入用的配置不同，其内部构造的差异较大。图 9.39 是普通的构造照片，图 9.40 表示了构成的要素。下面将要阐述的是各部分的主要功能和待研究的课题。

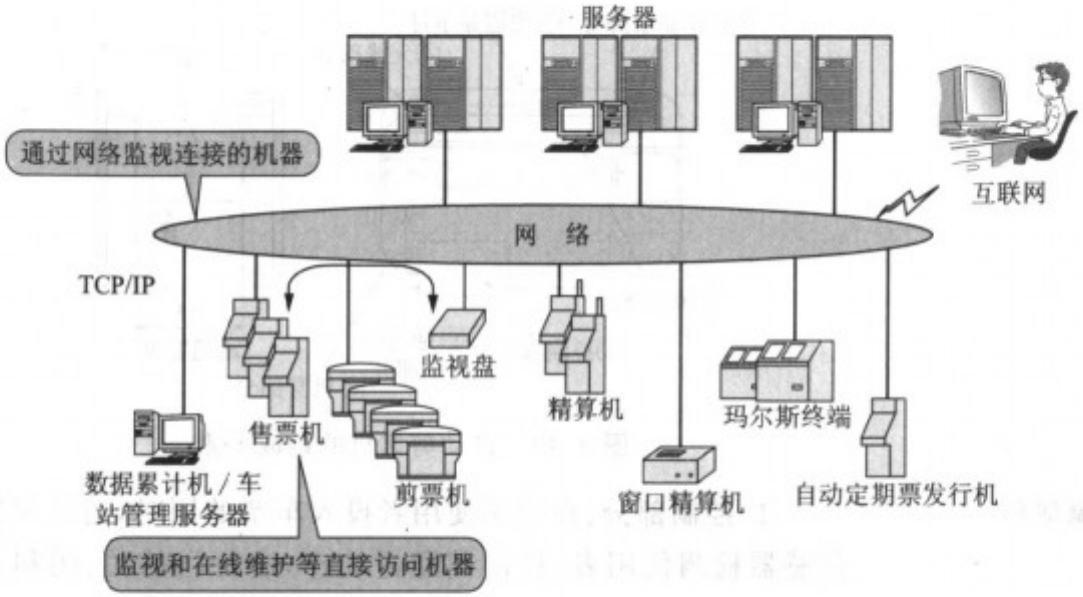


图 9.38 出票和剪票系统的主要构成



图 9.39 普通自动剪票机的构造照片

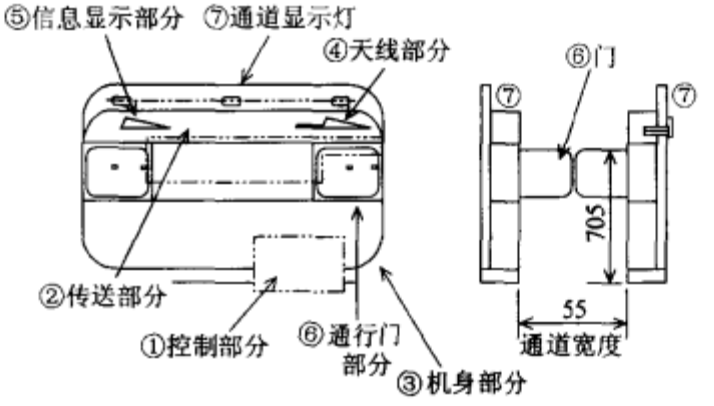


图 9.40　自动剪票机的构成要素

控制部分

① **控制部分**：在识别使用者投入车票的同时，通过位置传感器检测使用者，控制其通过动作，进行门的关、闭和导向。另外，在使用 IC 卡和磁卡时，还要将使用金额扣除，并制作成卖钱额数据，经过监视盘发送到累计器中，是剪票机最重要的组成部分。

传送部分

② **传送部分**：在图 9.39 中间上部显示的装置就是传送部分，通常被称为信息处理器。使用滚筒和带运送使用者投入的车票，在运送过程中还要进行磁性车票的读取和写入、打孔处理、打印处理等。可以说是自动剪票机心脏部分的重要机构。正在进行研究开发的课题有处理精度和维护。

机身部分

③ **机身部分**：基本上是由不锈钢板制成，形状是对使用者有利的圆形。上面还安装了指示行进方向的指示灯等。

天线部分

④ **天线部分**：在天线部分上部有半径约为 10 cm 的半球状的通信范围，在此范围内能够通过无线装置进行 IC 卡信息的读取和写入。当出现 IC 卡在通信范围内的停留时间极短等问题时，就有可能导致 IC 卡的读取和写入处理不能完成。为了防止这种情况发生，采取了张贴“请接触”的提示语的措施，以增加在通信范围内的停留时间及减少使用者使用方法的偏差。最近，为了增加接触时间，在自动剪票机上贴有要接触 1s 的提示。

信息显示部分

⑤ **信息显示部分**：其作用是显示 SF(Stored Fare)卡的余额和定期车票的有效期预告等。

通行门

⑥ **通行门**：对将车票不投入自动剪票机者和使用余额

SF卡

不足的**SF卡**者，不放行。门有常闭型和常开型这两种类型。对于出口或入口专用机，通常门是关闭的，只有乘客将正常的车票投入到自动剪票机时门才能够打开的**常闭型**；对于出口和入口两用机，通常门是敞开的，当识别到余额不足的车票等无效情况时，将门关闭的**常开型**。当连续有乘客通过时，常闭型的门是敞开的，如果5 s没有乘客通过，门自动关闭。对于两用机，由于需要出入双向通行，一般是常开型的。

常闭型

常开型

另外，在日本不使用欧洲常见的旋转式的硬件门，而使用自己独特的**软件门**。这种门的设计追求精神上的阻挡，与欧洲的一定要阻挡住身体不同。

软件门

将门软件化，可以降低门的安装位置，主要是从安全的角度考虑，保证孕妇的安全，以及在关门时不会将人撞到。虽然安全性应该优先放在第一位，但是，也有不少人恶意利用这一特点，强行通过，所以，这也是需要研究的课题之一。

⑦ **通道显示灯**：有儿童灯（白色）和异常灯（红色）等。儿童灯是在使用儿童票时亮的灯。

通道显示灯

通道显示器

根据早晚的乘车高峰期，需要调整出入的方向，采用在自动剪票机的上方设置通道显示器，表示该口是否可以通行。但是，因使用者不习惯，最近已不常使用。

监视盘

监视盘最多可以连接16台自动剪票机。其主要功能是将自动剪票机以1通道为单位连接电源，确认使用者的判定结果是NG，以及确认自动剪票机的异常状态。站务人员通过监视盘能够远距离操作、监视状态。

监视盘还具有信息分配功能。从被连接的自动剪票机上收集通过者类型等数据、累计从各自动剪票机传来的SF使用金额和IC卡的使用信息等，并将这些信息发送给数据累计器等。

数据累计器

数据累计器是经过监视盘，将通过自动剪票机的人数以及使用SF卡的卖钱额等累计在末端，并将累计结果发送

到上级系统、输出卖钱额的账单等。

另外，由数据累计器还能够设定监视盘和自动剪票机内的日期和时间。

传送部分（信息处理器）的构造和功能

信息处理器是自动剪票机中处理磁性车票的主要机构部分（见图 9.41）。

投入口

① **投入口**：这是将车票投入自动剪票机的入口。如果误将 IC 卡投入，会导致 IC 卡在运送部分被卡住，所以，入口的间隙要小于 IC 卡的厚度，保证 IC 卡送不进去。

分离部分

② **分离部分**：对于新干线型的自动剪票机，当一次将数张车票同时投入时，由于不能够分别读取磁性信息，所以必须分离成单张的。

分离机构

如图 9.42 所示的**分离机构**，用上下转速不同的带夹着重叠的车票，在运行过程中利用上下带的速度差将重叠的车票前后分离。

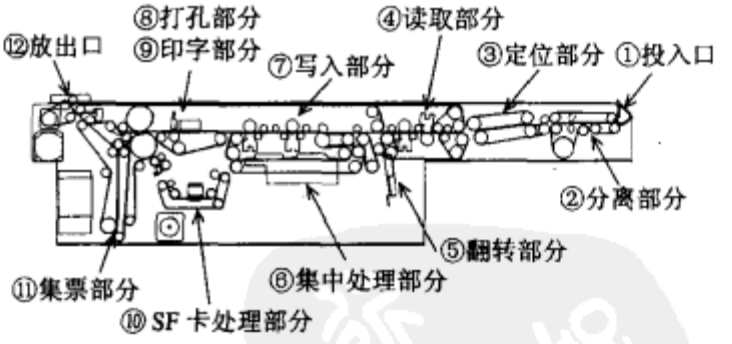


图 9.41　信息处理器的构造

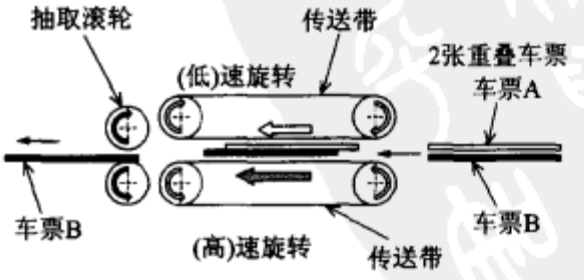


图 9.42　分离机构

定位部分

③ **定位部分**：将定期票和电子票（由售票机出售的票 30mm×57.5mm）在同一个机械上处理时，存在车票尺寸不

同的问题，即若按定期票设计则入口大，电子票投入的方向就无法规范，会出现斜着进入的情况。因此，需要设计将投入车票的位置摆正进行姿态控制的**定位机构**。

定位机构

车票投入时，电子票有正、反、纵、横 8 个方向，定期票有 4 个方向，其定位部分如图 9.43 所示。在运送车票的同时要调整车票的姿态，使其磁条与磁头的磁道位置吻合。但是，如果使用者将车票揉搓得很严重时，如何处理车票变形是需要进一步改进的问题。

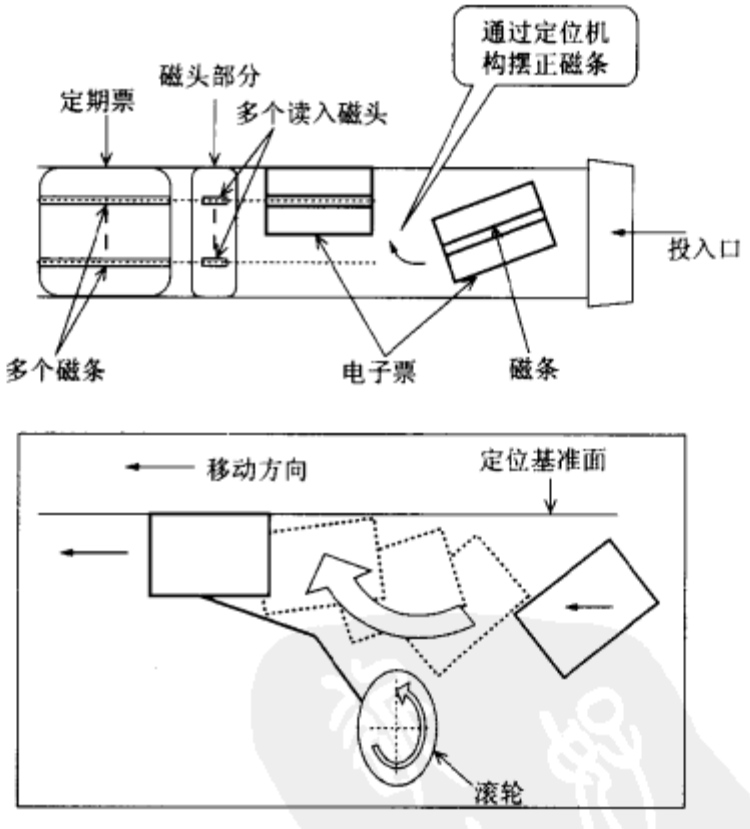


图 9.43 进行车票姿态控制的原理(排队机构)

读取部分

④ **读取部分**：用磁头读取车票上记录的日期、乘坐站点、SF 卡的余额等磁性信息。在国外，对车票投入的方向和正、反面均有规定，所以自动剪票机的读取磁头较少。而在日本，为了避免误投入会降低处理效率，对投入的方向和正、反面没有限制，可以在自动剪票机内进行处理。因此，需要的磁头数量较多。

翻转部分

⑤ **翻转部分**：如果投入的是反面(编码面)，磁头就读不出磁性信息，为此设置了将其翻转的翻转机构。旧款的自

动剪票机没有翻转机构，安装了6个价格高的磁头来读取正、反面投入的车票。新款机器设置了**翻转机构**，用4个安装在下面的磁头就可以进行磁码的读取和写入。由于磁头的价格高，所以，使用磁头的数量直接影响到自动剪票机的成本，并且准确地进行读、写处理的调整也相应变得复杂。虽然有了将车票简单反转的机构，但翻转部分成本的降低对自动剪票机的影响仍然较大。

翻转机构

⑥ **集中处理部分**：在新干线上设置的自动剪票机等，有可将多张投入的车票进行组合识别，识别后进入磁性写入的机构。

集中处理部分

⑦ **写入部分**：在写入部分使用与读取部分相同的特制的磁头将进出的车站、乘车时间和SF使用金额等写入。由于这种磁头构成的部件价格高，磨损的速度很快，所以大部分的维护成本都用于磁头的间隙调整和更换费用。自从使用自动剪票机以来，车票的磁性面与磁头间的磨损机理一直没有研究清楚。这是需要开发研究的摩擦学问题。

写入部分

⑧ **打孔部分**：用于在使用完了的车票上打出直径为3mm的孔。

打孔部分

⑨ **印字部分**：通过直接加热方式在固定乘车次数的票面上印字，如乘车日期、时间等。

印字部分

⑩ **SF卡处理部分**：SF卡处理部分的作用是向SF卡上打表示余额的孔，在卡的背面印上使用日期、乘降站点、初始金额和余额等。

SF卡处理部分

⑪ **集票部分**：需要回收的车票通过回收票部分装入回收票箱。

集票部分

⑫ **放出口**：将处理完的车票通过出口送出。

放出口

题外话

儿童的识别方法

自动剪票机不能够识别真正意义上的“成人”和“儿童”，因此，当有儿童票投入时，自动剪票机上部设置的表示儿童的显示灯发光。

在自动剪票机上设置了 12 对检测乘客的传感器(见图 9.44)。通过透射式传感器或反射式传感器得到的高度与标准进行比较,识别“成人”和“儿童”。检测高度位置的传感器根据安装位置的不同,可分为透射式传感器或反射式传感器。

自动剪票机确定“儿童”的条件是在上部设置的“乘客检测”传感器的光亮不发生变化。另外,在 70cm 的高度设置传感器的光亮发生变化时,适用于减免票儿童。这一高度的设置,主要是考虑 1 岁孩子的平均身高在 72～78cm,能够行走孩子的身高在 70cm 以上。

当有免票儿童通过时,在判定了有效票以后的一定时间内,自动剪票机将门打开允许儿童通过。

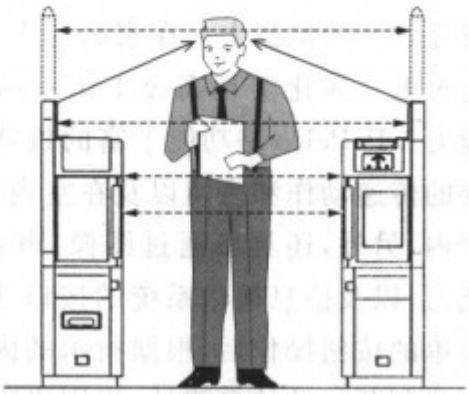


图 9.44 乘客识别传感器

8　个人机器人 PaPeRo

要　点

对于在家庭与人一起生活的机器人，要求具有适合与人通信的能力。PaPeRo 是为提高通信能力而开发研究的试制机器人，通过各种传感器技术、识别技术，可以在家庭进行监控评价。

解　释

个人机器人

个人机器人简介

个人机器人 PaPeRo 是以在家庭与人一起生活为目标而研究试制的机器人。在家庭与人生活的机器人不仅要能通过机电一体化实现高级工作，还必须要有适合与人通信的能力。PaPeRo 是功能丰富的机器人，在身体能力方面将必要的传递动作和表情以及在室内移动的功能限制在最小限度内，另外，还具备通过图像、声音识别和动作与人沟通的能力，以及信息通信系统的接口功能等。即：与原来的通过简单的按钮操作后，根据指示的内容动作的机械不同，具有自我判断行动的自律性、识别出现的对象、并能够与人积极对话、提供信息，是具备与人自然地进行双向交流界面的机器人。图 9.45 所示为其外观，表 9.7 是其主要构成。

伙伴型机器人

在研究开发注重与人双向交流的**伙伴型机器人**时，需要研究在实际环境中的普通用户喜欢什么样的机器人，以及机器人的哪些行为是重要的？PaPeRo 就是以实际环境作为研究的平台，其特点如下。

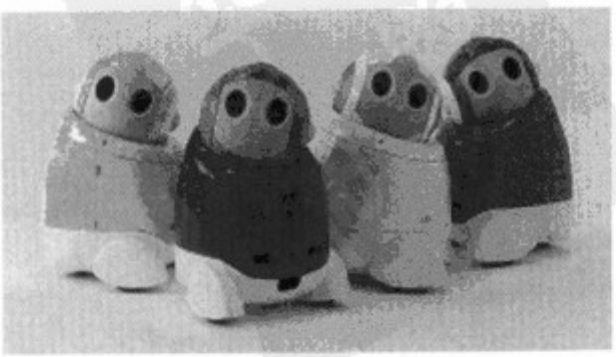


图 9.45　个人机器人 PaPeRo

表 9.7 PaPeRo 构成一览表

尺寸	高度×宽度×深度	385mm×248mm×245mm
	质量	5.0 kg
	连续工作时间	2～3h
	充电时间	2～3h
	能够识别的语句数	约 650(评价用脚本)
	能说的语句数	约 3 000(评价用脚本)
输入部分	视觉传感器	CCD 相机×2
	听觉传感器	检测声音源方向用话筒×3 识别声音用话筒×1
	拍头检测开关	用于识别被拍和被按
	抚摸头检测传感器	用于识别被抚摸
	超声波传感器	5 个(前 3 个、后 2 个)
	台阶传感器	用于发现前方的台阶
	举起传感器	用于识别被举起
输出部分	足部	前轮 2 个、后轮 1 个,共 3 个轮(两个电机驱动前面的 2 个轮,后轮是脚轮)
	头部	通过两个电机驱动上下、左右转动
	声音	通过两个扬声器播放语言和音乐
	脸部	眼:LED8 个(寻找人时闪烁)
		口:LED9 个(说话时闪烁)
		脸颊:LED2 个(在有表情时使用)
		耳:LED2 个(识别声音时亮)
接口	遥控传送部分	发送 TV 遥控信号
	图像声音输出	能够连接 TV
	网络	通过无线 LAN 连接
	扩展口	与 I/O 口连接,能够作为 PC 使用
	USB	能够连接无线 LAN 等各种扩展设备

① 具有支持机器人与人交流的设计和构造。

② 面向家庭中的孩子和老人使用,具有小型化、轻量化、可靠性和安全性高等特点。

③ 适应现场作业的独立操作的动作。

④ 通过提高元、器件的技术提高性能。

⑤ 充实了能够耐受长期现场作业中相互交流的变化。

⑥ 为了使人文和设计等系统的各种研究人员都能够顺利地进行各种实验，完善了新动作和行为的开发环境。

⑦ 具有各种功能的扩展性能、能够在研究功能模式的伙伴之间交换的扩展性能、通用平台性能。

PaPeRo 的功能

通过软件能够改变和增加以下功能，如通过网络能够传递新功能和动作。

检测声源方向的功能　在躯干上安装了 3 个话筒，根据声音到达时间的相位差，在 360°范围内进行检测。

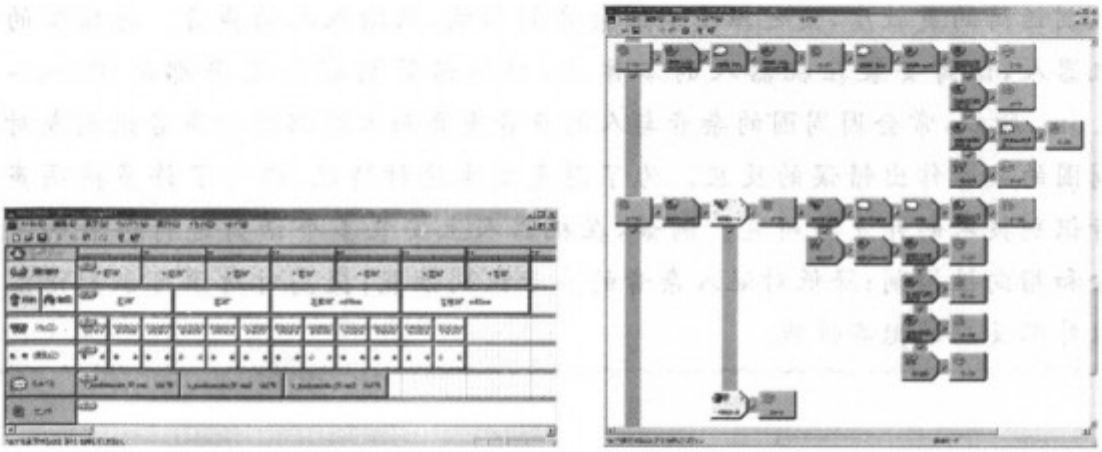
检测障碍物(图像识别)　在自律移动中将通过三维照相机输入的图像实时处理，检测障碍物以及探测出能够不与障碍物碰撞向前行进的路径。

人物的检测、跟踪、记录和识别(图像识别)　将动作检测作为基点进行面孔检测，通过三维处理进行距离测算，通过样板选配进行跟踪，通过判别分析进行人物对照。面孔的记录是通过对机器人进行“记忆面孔”等对话实现的。

声音识别　对于在家庭环境中动作的机器人，因为避免产生对机器人指令以外声音的错误反应是非常重要的，所以要提高无用语汇的抛弃性能。其结果是大幅度地减少了误动作。另外，为了能够在嘈杂环境中识别声音，装备了通过从多个话筒输入的声音进行信号处理去除杂音的技术。

信息通信功能　将多种功能进行组合，如声音和视频留言的记录和播放、邮件的接收和播放、话筒、自动报时、闹铃、TV 遥控、网络信息的获取、进行对话的对象、内容的积累和提取等功能。

软件平台　具有研究、实验和开发平台的各种功能。动作和行为能够用视觉编辑制作(见图 9.46)。



(a) 动作编辑　　(b) 脚本编辑

图 9.46　视觉编辑制作

PaPeRo 的动作脚本

在进行家庭环境的各种调查时，人们提出要能够和用户在一定的时间内一起娱乐的提案（评价用脚本）是必须考虑的。由此开发出能够根据下面两个模式动作的脚本。为了实现这些动作，装备了大约 650 个语句的声音识别和共 3000 种的发声。

散步模式　能够实施在房间中散步和假睡的演出脚本。被人呼唤时回头，见到人时主动到人近前识别，这时的机器人会根据感情和对识别对象的好感度和亲密度，选择对话或逃避。

对话模式　装备了猜谜、抽签、舞蹈和不倒翁等游戏功能，以及 TV 遥控（家用电器的控制）、留言、接收邮件（支持通信）、天气预报（获取互联网的信息）、闹钟和自动报时等日常生活中有用的功能。

篇外话

机器人的声音识别技术

近年来，声音识别技术已经不断地在作业现场、家庭和办公室的计算机等方面实用化，但这些几乎都是使用听筒。由于口和话筒的距离较近，可以

控制话筒的灵敏度，使之不受周围杂音的影响，只输入人的声音。通信型的机器人，话筒安装在机器人的本体上，口与话筒的距离几乎都是30cm～1.5m，所以，常会因周围的杂音与人的声音重叠而不能够进行声音识别或对周围的杂音作出错误的反应。为了避免发生这种情况，进行了许多提高声音识别技术的开发与研究。例如，在机器人上安装多个话筒进行杂音的去除和指向性控制；降低对混入杂音的声音识别性能；提高对所谓可识别语汇以外不反应的抛弃性能。

第10章

日本机器人竞赛大会

●责任编委
樱井　诚
中田信明

●执　笔
冈村　猛(1)
高桥　勉(2)
畠山和昭(2)
芦野广巳(3)
小川　忍(4)
石川　浩(5)
村冈好久(6)
佐藤敏幸(6)
深谷直树(7)
小柳荣次(8)
松元明弘(9)

实际制作机器人或自动机械是深入理解机电一体化技术的捷径。

想必也有许多人从儿时起就喜爱机器人，盼望能有亲自制作的机会。现在，以高中生、专科生、大学生及社会各界人士为对象的机器人竞赛很多，日本全国各地都在举办各种机器人竞赛。本章将介绍9例由技术学校、中等专业学校及高等职业专科学校举办的竞赛实例。

大家一定都会期待着机器人竞赛大会能够在自己的学校、地区或工作单位举办，同时也会非常关心同龄对手的情况。希望这些竞赛实例能够对读者有所帮助。

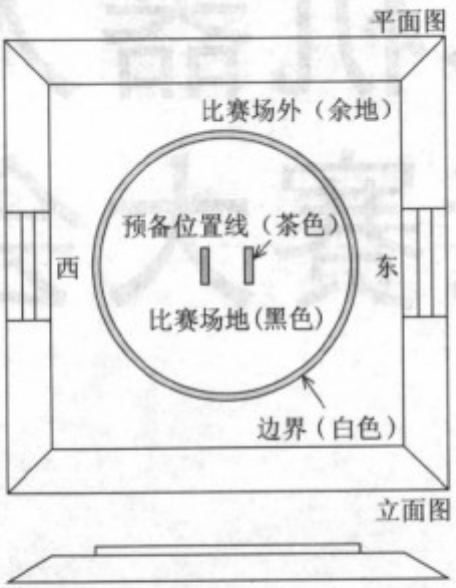
1 “相扑机器人”竞赛大会

竞赛内容

相扑机器人
自律型
遥控型

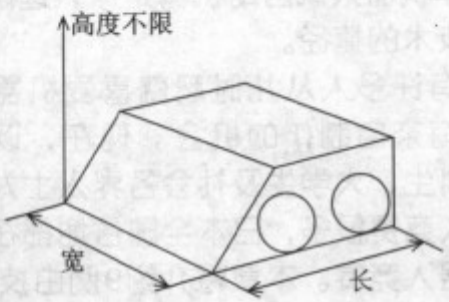
全日本相扑机器人竞赛大会的**相扑机器人**有 3kg 级和 10kg 级，还可分为按下启动开关后机器人按程序动作的**自律型**和由人遥控操作的**遥控型**这两种。

比赛是按照规则，在规定的比赛场（见图 10.1）中使用按规定制作的机器人（见图 10.2）进行比赛，由裁判员决定胜负。



	3 kg级	10kg级
直　径	1540 mm	2270 mm
预备位置线	200 mm×20 间隔200 mm	300mm×20 间隔300mm
边　界	50 mm	100 mm
材　质	冷压钢板:SPCC	
余　地	比赛场外1000mm不能用白色	
高　度	50 mm	

图 10.1　比赛场的规格



	3 kg级	10 kg级
宽×长	200mm×200mm	300mm×300mm
高　度	不限	
质　量	3 kg以内	10 kg以内
	遥控型的不含Proportional	

图 10.2　机器人的规格

比赛程序

① 为了保证安全，要穿戴好防护眼镜、手套和运动鞋。按主裁判的手势敬礼后进入场地，分别将自己的机器人放

在比赛场上。

② 随着裁判员“开始”的手势，比赛开始。但是，对于自律型机器人，动作必须是在按“开始”手势按下启动开关后的5s开始，参赛的双方都要迅速撤离，退到场地以外。

③ 比赛规则是将对方机器人推出比赛场地者为胜方，在比赛场上即使机器人被推翻也不算输。比赛以3min内的3个回合分胜负，在比赛时间内2次领先者为胜方。中止比赛和比赛结束都要按主裁判的手势，马上停止机器人的动作。但是，为了安全起见，使自律型机器人停止动作必须**远距离操作**（遥控）。在主裁判宣布胜负后，双方参赛者在场外敬礼，比赛结束。

远距离操作

我们的机器人

图10.3和图10.4是日本大宫工业高等电子学校机械专业的学生制作的自律型机器人和遥控型机器人。

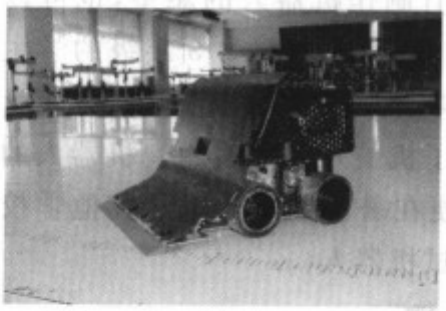


图10.3 自律型机器人3kg量级

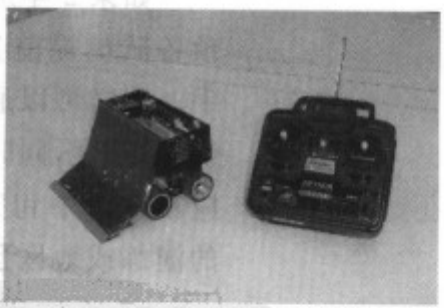


图10.4 遥控型机器人3kg量级

自律型机器人的基本构造

无论是自律型机器人还是遥控型机器人都要有属于机械部分的机架。通过齿轮和链轮将电机的旋转运动传递给车轮，车轮要与比赛场地接触，可以利用磁铁的吸引力来加强机器人与比赛场地的附着力。另外，还需要在机器人本体或电池盒上固定一个铲板。

自律型机器人上要安装微型计算机和传感器，以便能够进行自我控制。因此，在按开关起动后，需要将检测对手的传感器和检测比赛场地的传感器发出的信号作为输入信号，通过微型计算机的程序控制电机。

遥控型机器人的基本构造

遥控型机器人要使用 Proportional 系统实现人对机器人的控制。用接收机接收由 Proportional 系统发出的电波，然后将该信号通过控制器转换成电机的正、反转信号，由驱动电路驱动电机转动。

与制作相关的事项

通过课程安排

日本大宫工业高等电子学校将相扑机器人作为**毕业设计**(第3学年)的课题，由电子机械和机械专业的学生来完成。

毕业设计

准备和制作的时间

由于日本地区大会是在9月中旬举办，仅依靠课堂上的时间很难完成机器人的制作。所以就要利用课余时间或暑假的时间。

如果2年级的学生有制作机器人的愿望，也可以作为预备队员提前参加机器人竞赛大会，为3年级的学生当助手。这样可以通过对竞赛规则的理解，感受机器人竞赛的快乐、难度，同时也学习了机械及电子技术。机器人的制作应在8月中旬完成，以便在暑假期间通过与其他学校进行的演练或地区预赛来调试机器人。

相扑机器人的乐趣

如果仅仅是按设计要求完成机器人的制作，这并不是制作相扑机器人真正乐趣所在。学生只有在与其他学校进行的演练和参加地区大赛的过程中逐渐被相扑机器人吸引，萌生兴趣、热情及斗志，才能不断改进机器人，战胜对手的机器人。

涉及的机电一体化技术

底盘部分的制作

(1) 电机的选用

电机选用 MAXON 公司生产的输出为 90W 的附带齿轮的直流电机，左右各一个，见图 10.5。输出应越大越好，但输出大的质量也大。这时可以通过提高电压来获得较大的输出。



图 10.5 高输出电机

(2) 电机轴的力传递

四轮驱动

由电机轴输出的力通过小齿轮到大直齿轮进行减速，然后利用链轮和链子带动车轮，是**四轮驱动**的。选择减速比时要考虑电机的驱动电压和车轮的直径，以及机械部分的速度。

由于比赛对机器人的大小尺寸有所限制，所以，能够反映齿轮轮齿大小的模数范围应为 0.5～1。另外，直齿轮和链轮的齿厚要用车床或铣床等减薄。

(3) 磁铁与铲板的关系

使用钕磁铁将机器人吸附在比赛场地上。这时，要通过能够对机器人与场地表面的间隙进行微调整的楔形垫片来调整吸附力。

铲板要安装在机器人的正面，其作用是能够插入对手机器人的下方来攻击对手。因此铲板的前端要作出锋利的薄片状齿形。需要注意的事项：为安全起见，在机器人相互接触或动作过程中，绝对不能使用可能飞溅的材料零件；比赛过程中不允许调整或更换铲板；铲板必须与本体完全固定。

磁铁的吸附力与铲板之间的关系是直接影响胜负的关键问题，也是必须认真研究的问题。

(4) 其他零件

车轮要给出材质、直径和轮胎宽度，要依靠学校附近的工厂进行制作。轮胎宽度的选择也是需要研究的问题，宽度尺寸越大，与地面接触的面积就越大，但同时也带来使机器人的旋转力降低等问题。

电池采用小型的镍电池，6 个一组，根据需要串联电池(如 7.2V×3)。

电路部分的制作

(1) 基本电路

图 10.6 是构成基本的相扑机器人的电路模块。

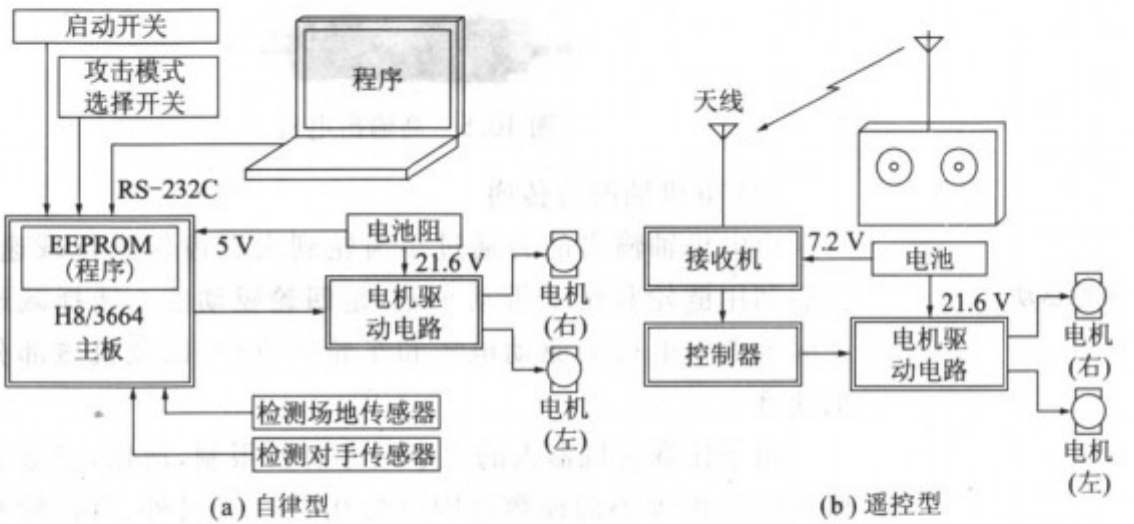


图 10.6　相扑机器人的电路构成

(2) 电机驱动电路

自律型和遥控型的机器人都不能够用微机或遥控器直接驱动电机，都需要制作电机驱动电路。制作的电机驱动电路如图 10.7 所示。

并列使用 2 个规格为 60A 的 FET 可使大电流通过，理论上能够达到 120A。通过改进基本的 H 桥，用 FET 下半部分的 n 沟道的开/关来控制 FET 上半部分的 p 沟道，以防止过渡时短路。

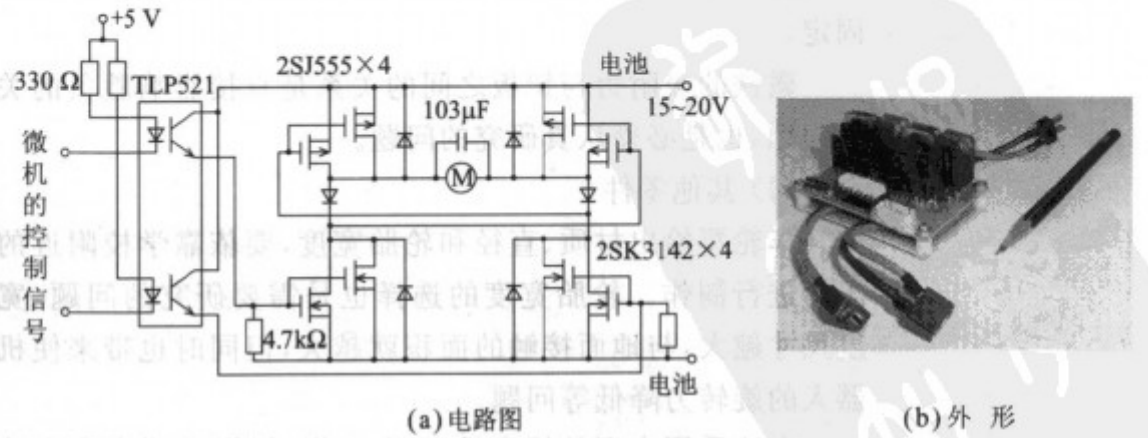


图 10.7　电机驱动电路(适用于大电流)

(3) 自律型机器人用的微机和遥控型机器人用的遥控器

自律型机器人上安装的 CPU 是使用在市面上购买的微机主板 H8/3664，见图 10.8。

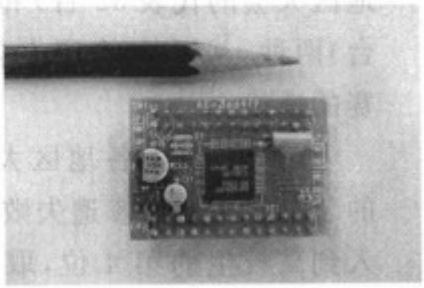


图 10.8 微机主板

机械电子专业二、三年级的学生，在实习期间就要使用这种微机主板，学会用 C 语言控制微机，在组装时就比较轻松了。

遥控型机器人用的遥控器，可以使用在市面上购买的遥控器，根据 Proportional 系统的切角将接收器发出的信号转换成控制电机正转和反转的信号。

(4) 传感器

自律型机器人上的场地检测传感器配置在前方的左、右两侧，是两个光电传感器，可起到防止机器人出界的作用，其控制是通过微机和程序进行处理。图 10.9 是场地检测传感器的电路。



图 10.9 场地检测传感器的电路

自律型机器人上的对手检测传感器配置在前方、前方的左右两侧和后方，用 4 个光电传感器。虽然现在各公司已经推出了各种传感器，但使用的是对颜色、倾角及距离测定敏感的多反射型传感器。多反射型传感器的特点是对颜色和倾角敏感，这也是反射型传感器的缺点，检测操作稳定，最适合用于检测对手机器人。

参加竞赛

目标是 3kg 级的全国大赛

全日本相扑机器人的全国大会有高校生全国大会(各

地区大会的代表 32 台)和全国大会(各地区大会的代表 64 台)两种。要参加全国大会必须经过全国 10 个地区的选拔赛的选拔。

首先参加的各地区大会是东北大会,开始阶段因机器的装置费功夫而惨遭失败。但在最后一战的关东大会上进入到高校生的第 4 位,取得了进入全国大赛的门票(见图 10.10)。

在全国大会上,经过许多努力取得了全国第 8 的好成绩。比赛过程虽然艰难,但乐趣无穷。学生从参加比赛到从各种比赛一路走来得到的各种经验都是通过自己亲身体验的。

通过参加大会感到,赛场上比的不仅是机器,选手的技术也直接左右着胜败。经验的积累、各种不同情况的应对都与胜负有关,这一点也会对毕业后在工作岗位上带来影响,在职业学校学到的技术也将用于社会。



图 10.10　大会现场

竞赛参加者

指导教师:冈村猛,吉崎正希(机械电子专业)

学生:"宫工锦":柳谷智(机械电子专业 3 年级)

"宫工龙":冨田悠贵(机械电子专业 3 年级)

"宫工海":石川翔太(机械电子专业 3 年级)

(埼玉县立大宫工业高等学校)

2 寻线竞赛大会

竞赛内容

寻线竞赛

全日本微机遥控迷途通过竞赛

寻线机器人竞赛

寻线竞赛是要求机器人按画好的线路行走，是行走速度的竞赛。在此介绍的竞赛是**全日本微机遥控迷途通过竞赛**大会的竞技项目之一——**寻线机器人竞赛**。寻线竞赛是俗称，在上述大会中使用的名称是寻线机器人竞赛。

寻线机器人竞赛的场地是黑色的，上面画有宽度为1.9cm的白色线路，机器人要按白线行走，根据行走速度决定胜负。具体的竞赛内容为记录机器人绕规定线路行走一圈所需要的时间，另外，还要能够在规定的3min内行走3圈。

线路是由直线和曲线组合的连续闭合线路，最小旋转半径为15cm，线路长度小于60m(见图10.11和图10.12)。需要注意的是在比赛之前不知道线路的情况，也不允许试行走。



图10.11 寻线机器人竞赛的预赛线路



图10.12 寻线机器人竞赛的决赛线路

在封闭的线路上有起点和终点，并且分别设置了门。终点在起点后方的1m处，将两门之间的区域叫做启动-结束区。起点标志和终点标志贴在行进方向右侧的规定位置上，要求机器人在到达终点后的2s内自动停止(不能够停止记录无效)。

另外，在线路有曲率变化的地点都有弯道标志，贴在行进方向左侧的规定位置上。成绩好的机器人在跑第一圈时，会检查这种标志，并能够计算线路的直线段和曲线段的

数据(曲率和直线长度)。因此在第 2 圈以后,就能够做到直线段加速,弯道前减速,每圈平均速度超过 1m/s 的机器人为数不少。

参加这种竞赛的人员以高中生和职业高中的学生为主。每年要从 100 台以上的报名者中通过预赛选拔出 40 台左右进行决赛。

我们的机器人

图 10.13 至图 10.16 是狭山工业高等学校和新座综合技术高等学校制作的寻线机器人。可分为用微机控制步进电机和用逻辑电路控制直流电机两大类。考虑传感器数量、电路板以及电机与电池组的平衡,制作了各种不同类型的寻线机器人。各种机器人的规格请参照表 10.1。

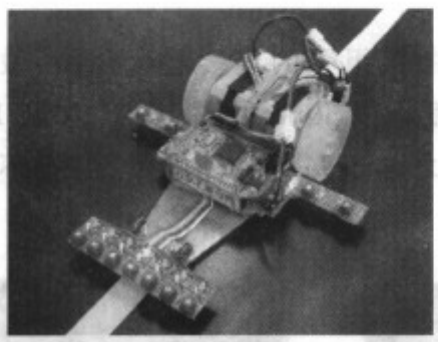


图 10.13　微机控制步进电机
(低重心、轻量化,复合玻璃底盘。座综合技术高等学校的指导者制作)

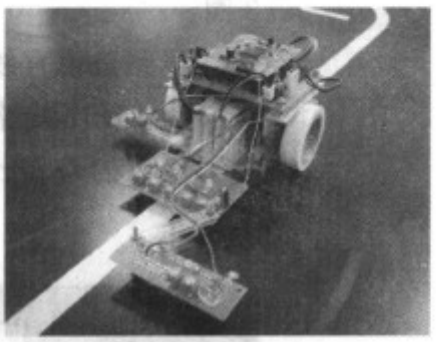


图 10.14　微机控制步进电机在前方有弯道标志。狭山工业高等学校的学生制作)

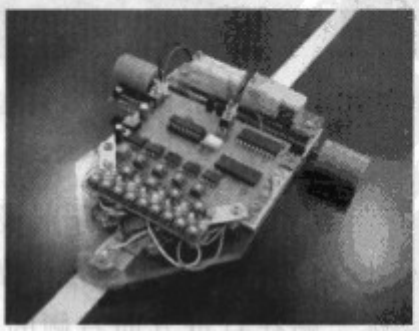


图 10.15　逻辑电路控制直流电机(两轮驱动)
(检测线路传感器 9 个,低重心,部分处理使用 PIC。狭山工业高等学校的指导者制作)

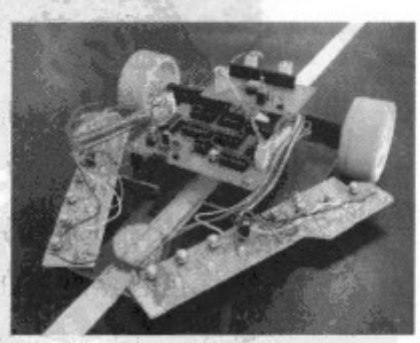


图 10.16　逻辑电路控制直流电机(两轮驱动)
(检测线路传感器 16 个,低重心,未安装微机。新座综合技术高等学校的学生制作)

表 10.1 各种机器人的规格

	步进电机型（见图 10.13）	步进电机型（见图 10.14）	直流电机型（见图 10.15）	直流电机型（见图 10.16）
全长	210mm	250mm	180mm	240mm
全宽	170mm	180mm	170mm	250mm
高度	50mm	80mm	40mm	65mm
轮胎直径	49mm	48mm	22mm	58mm
质量	620g	860g	530g	500g
检测线用传感器	7 个	5 个	9 个	12 个
弯道检测用传感器	4 个	4 个	2 个(右侧)	4 个
控制电路	H8 微机	H8 微机	逻辑电路	逻辑电路
电池	镍氢电池 21.6V	镍氢电池 14.4V	镍氢电池 14.4V	镍氢电池 14.4V
电机	2 个	2 个	2 个	2 个

与制作相关的事项

毕业设计

通过课程安排

狭山工业高等学校和新座综合技术高等学校电子机械专业将寻线机器人作为**毕业设计**的课题。

由于微机遥控迷途通过竞赛大会是在每年的 11 月下旬举办，所以仅依靠课堂上的时间很难完成机器人的制作，要利用课余时间或暑假的时间。

通过部活动和志愿者活动安排

狭山工业高等学校的机电一体化专业和新座综合技术高等学校电子机械部，组织信息技术专业的学生在志愿者活动中用 1～2 年的时间制作寻线机器人。

制作的时间

机器人制作的日程安排如表 10.2 所示。

表 10.2　制作寻线机器人的年度计划

月　份	计划内容
4 月	制定寻线机器人的制作目标 通过讲座、实验和多次实习，学习工作原理以及各零件的动作、底盘的构造及其设计方法、微机控制等基础知识
5 月	进行电路和底盘的设计。制作电路图、基板的线路图、整体配线图、底盘图纸、微机的输出/输入口一览表等设计说明书。确定已完成的图纸，制作零件明细表
6 月	根据电路图、基板的线路图、整体配线图、微机的输出/输入口一览表、微机接口配置图在电路基板上布置零件
7～8 月	制作电路和底盘，确认动作 组装电路和底盘 编制控制程序
9 月	调整根据试车得到的行走数据，调整底盘的平衡
10 月	调整行走数据，改进完善机器人
11 月	作参赛前的最后调整 参加微机遥控迷途通过竞赛大会的寻线机器人竞赛

制作寻线机器人的乐趣

制作寻线机器人能够学习到许多知识，通过制作底盘可以学习到机械技术，通过制作电路可以学习到电子技术，通过编制控制程序可以学习到信息技术。另外，要实现制定的比赛目标，必须要有许多创意，即使制作完成机器人也不是对其改进的结束，这些都是制作寻线机器人的乐趣。制作寻线机器人是培养逻辑思维和解决问题能力的最佳方法。

涉及的机电一体化技术

底盘部分的制作

寻线机器人通过左右各一个电机的转速差来控制行走。直行时左右电机的转速相同；转弯时调整两电机的转速差。

使机器人旋转需要的两个电机的转速比可由左右轮距、轮胎直径、传感器与车轴的距离等数据求得，见图 10.17。底盘上需要安装电机和传感器等零、部件，设计时需要充分考虑空间的利用率。

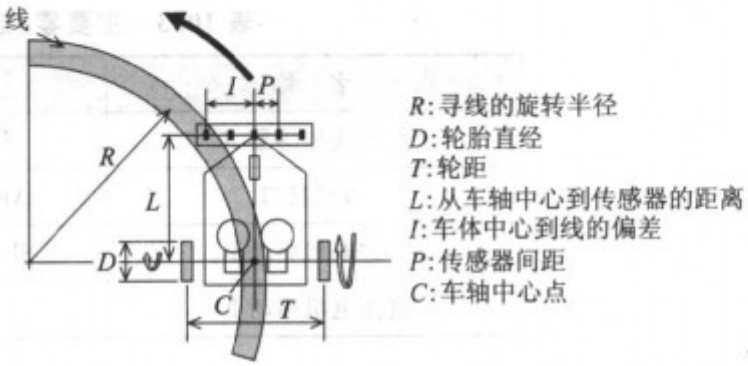


图 10.17 寻线机器人与旋转半径的关系

根据设定的旋转半径计算出的左右轮的转速比，是以能够滑动旋转为前提的，但实际情况并非如此。所以必须进行反复的行走试验。

另外，旋转速度高时，就需要考虑惯性矩。为了减小惯性产生的离心力，机器人应轻量化。电路基板和电池组等的配置平衡也是需要研究的重要课题。

车轮和轮胎的制作

车轮和轮胎是直接影响寻线机器人行走的重要因素。车轮材料使用丙烯和聚氯乙烯，既可以减轻质量，又可以使用车床加工。如果车轮直径大，旋转一圈行走的距离就长，这可以提高速度，但必须用大转矩的电机驱动。

轮胎的宽度越大，与地面的接触面积就越大，虽然可以提高轮胎的抓地力，但却降低了机器人的旋转能力。另外，如何选择与地面直接接触的轮胎表面材料也是一个重要的课题，为提高抓地力可使用橡胶和硅。

电路部分的制作

不仅是寻线机器人，在制作任何机器人时，选择电子元、器件都是一件辛苦的工作。例如，在选定检测路线用的传感器时，只能够从市面上种类繁多的传感器中选择一种。这时，就需要根据自己的预算及所掌握的技术，经过多方考虑选定一种最适合自己的。表 10.3 是这里使用的主要零、部件清单。

表 10.3　主要零、部件

名　称	型　号
红外线传感器 IC	S7136(浜松光产业)
微机接口	AKI-H8/3052F(秋月)
步进电机驱动 IC	SLA7033M(三原电器)
直流电机驱动 IC	4AM12(日立)

电源和步进电机的选择

使用步进电机的机器人是通过恒电流斩波驱动器来控制电流，要想提高电机的转速，就要提高电源的电压。但是，如果增加电池数量，势必就增加了机器人的整体质量，所以就选择了小型的镍氢电池和锂聚合物电池，将几个电串联使用(如 7.2V×2～7.2V×3)。

由于步进电机允许流过的电流约为 1A，所以要选择额定电压低的。这里使用的是 Shinano Kenshi 公司和日本伺服公司的产品。

控制程序的制作

使用 8H 的微机制作两相励磁脉冲信号，将该信号直接通过电机驱动电路输出，控制机器人的行走。另外，根据由中断处理得到的传感器的信息，确定左右脉冲频率(电机的转速)。

因为比赛要求机器人在行走一圈后的 2s 内必须在启动、结束区自动停止，所以机器人上要附加这种处理装置，即能够检测启动、停止的标志，也需到终点按停止的标志停止。

另外，还要求机器人在行走第一圈的过程中检测弯道标志，记忆线路的直线距离和弯道的曲率，以便在行走第二、三圈时，能够在弯道后加速，以较高的速度在直线段上行走；在弯道之前减速，以较低速度转弯。记忆线路是通过检测左右电机的转速和转速差实现的。

参加竞赛

寻线机器人竞赛中不一定是速度快的机器人获胜。因为起动后机器人是自律动作的，所以在比赛规定的3min内凝聚了在此之前的所有设计和制作的努力。微小的失误都将关系到线路和时间的错误。一圈之后到下一次启动的短暂时间内，冷静地判断线路和机器人的状况，如何充分发挥性能是非常重要的。在规定的3min内，第一圈应能够准确地行走，第二、三圈应如何快速行走，必须认真分析。感觉3min的时间太短了。

本次大会除有高校生、专科生和普通参赛者以外，还有来自海外的参赛者。其中，由高中生亲自制作的机器人的胜负是值得一看的。我校在全日本微机遥控迷途通过竞赛2004第25届大会上有3位获奖者。当学生看到比自己机器人速度快的机器人时都非常激动，这对他们来讲是一种激励。通过与参赛选手的交流，学会关注新技术，激发起向更高目标挑战的欲望。

学生们通过从自己学习知识到制作机器人，再到参加比赛，在反复的试运行中不断地纠正错误，迅速地成长起来。在比赛中得到的经验不仅仅是获奖，还学会了处理各种情况时的应对能力和知识的应用能力，这对将来走向社会以后也是一笔巨大的财富。

2004年度寻线机器人竞赛的参加者

指导教师：畠山和昭，小高昌人，大桥辰也（狭山工业高等学校）

小泽等，高桥勉，小坂洋平（新座综合技术高等学校）

学生：菊池和也（狭山工业高等学校机械电子专业3年级），其他9人

近藤健太郎（新座综合技术高等学校机械电子专业3年级），其他2人

井上顺大（新座综合技术高等学校机械电子专业3年级），其他1人

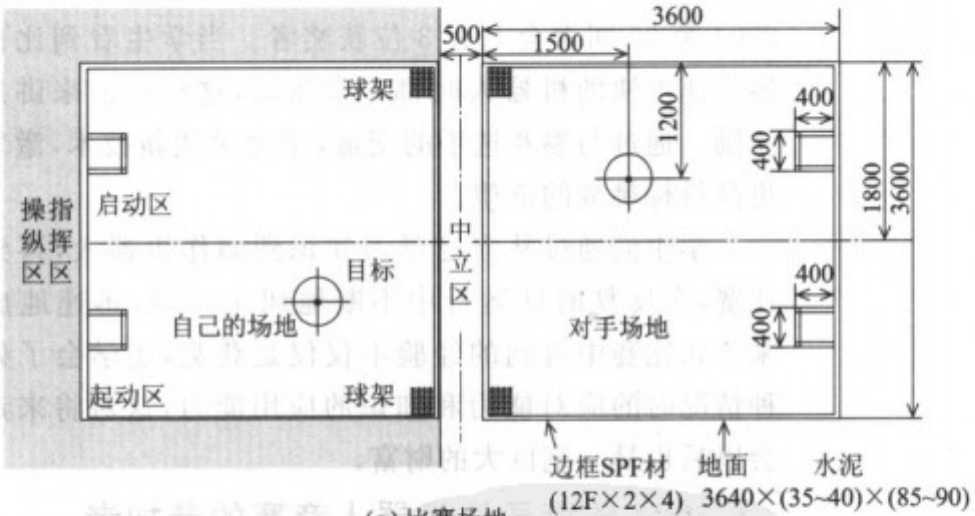
3　机构创意竞赛

竞赛内容

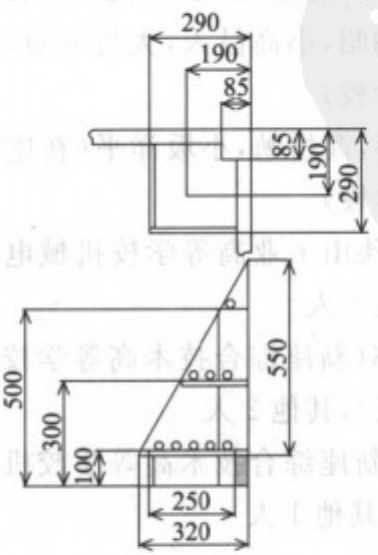
机构创意竞赛

机器人樱桃竞赛

从 1992 年开始举办的**机构创意竞赛**，暨日本全国高中生机器人竞赛大会山形县预赛，竞技内容与当地的特产有关。本次比赛的会场设在山形县寒河江市，是以当地的著名特产“樱桃”为题材的竞赛——**机器人樱桃竞赛**，是灵感来自“樱桃”收获和“樱桃”播撒的竞赛。竞赛内容是收获放在 3 层球架上的樱桃球，如图 10.18 所示，在规定的 3min 内向对手的场地和目标台投射得分，是对抗型的竞赛。



(a) 比赛场地



(b) 球 架



(c) 目 标

图 10.18　比赛场地、存放球的球架和目标

比赛规定可以使用 2 台机器人，总质量不得超过 12kg。每台尺寸控制在 400mm×400mm×400mm 以内，但在比赛开始后允许展开，高度不能超过 700mm（能在比赛过程中的 2min 之内复原）。

我们的机器人

吸引的方法

图 10.19 是系有细绳的 5 种不同的樱桃球。球是用柔软的布（内部是棉花）制作的，我们认为采用机械的方法拾起比较困难，因此设计了吸引和钓挂等许多方法，最后选用了**吸引的方法**。开始时考虑 2 台机器人分工作业（收获和投射），后来，为了保证制作的效率和比赛的演练，制作了 2 台相同功能的机器人（见图 10.20）。机器人的名字是“马耳西风”和“浅黄 2 号”。

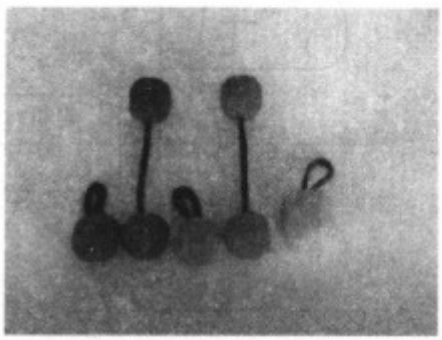


图 10.19　5 种不同的樱桃球

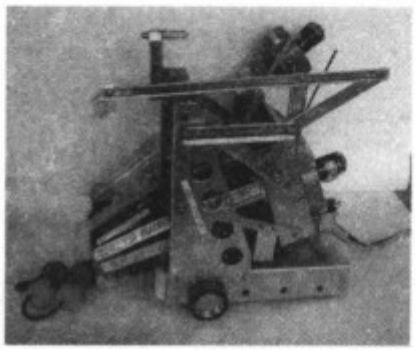


图 10.20　制作的机器人

与制作相关的事项

柔软的球

这次竞赛的重点是如何操作柔软的球。这一部分的构造是带有轴流风机的管道，可以将球大量地吸引和排出。

提高可操作性

将收获放置在 3 层球架上的球时，管子必须能够准确地上、下移动。为了提高操作者的可操作性，采用了遥控开关。

高得分目标

樱桃球按樱桃的成熟程度分成 3 种颜色（红、橙、黄）。在对手的场地上红色球得 1 分，橙色球得 3 分，黄色球得 10 分。如果将球投到 60cm 高处的目标台中可得高分（是投到场地上的 2 倍）。为了得到高分需要增大投球的角度，将管道口制作成能够集中瞄准目标的圆筒形。

螺纹锁紧

球的吸引和排放需要高转速的风机，如果有一个螺纹松动也会对机器人造成致命的威胁。为了使风机高速转动时绝对不会发生螺纹松动的情况，不仅要使用弹簧垫圈，还必须将螺纹锁紧后彻底固定。

涉及的机电一体化技术

自制风机

为了用同一个管道完成球的吸引和排放任务，采用了轴流风机。但轴流风机的中心压力低，容易产生逆流（见图 10.21），导致风量减少。为此，自己制作了只有外侧有叶片的风机，可获得高压力和大风量。

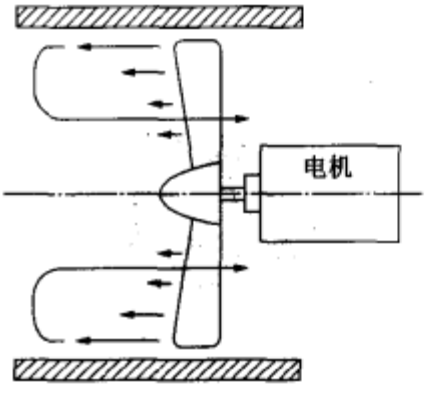


图 10.21　轴流风机

整流板

如图 10.22 所示，自制的风机使用铝板（$t=0.6\sim1.0$mm），首先在叶片根部的圆周上钻孔（$\phi3$ 左右），并用金属剪剪开，然后再用钳子将叶片弯成一定倾斜角度（15°～20°）的形状。叶片剪开的深度和宽度需要通过实验确定。为了得到足够的压力，又安装了整流板，使用 540 型的高输出电机，可获得所需要的风量和压力。

透明的聚氯乙烯板

管道的容量应能够放入所有的樱桃球，为了从外面就能够看见收获的球，材料使用透明的聚氯乙烯板（$t=0.6$mm）。管道的外形比较复杂，聚氯乙烯板之间相互连接时，只使用黏结剂强度还不够，还要用电烙铁焊接几十处，电烙铁的头部应插入连接处 2mm 左右。

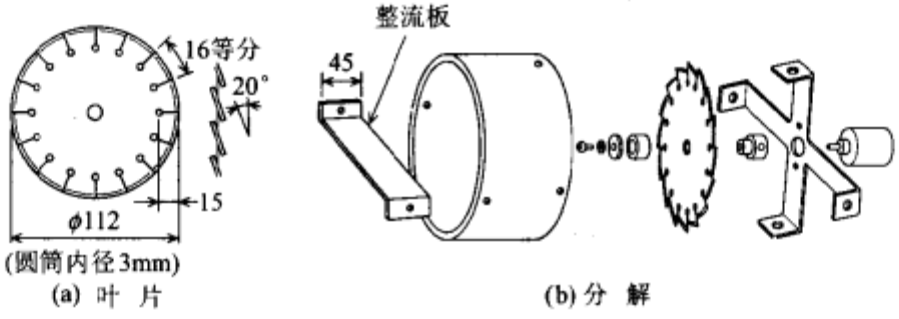


图 10.22 自制风机的构造

管道接头

管道接头最好使用聚氯乙烯材料的水暖管接头，价格低且精度高。但相同尺寸的有许多厚度，必须选用适合自己用途的。

连杆机构

控制管道上下移动没有采用“绳索卷取的方式，”而是使用四连杆机构，见图 10.23。管道的最低极限位置应为前端与地板接触的倾斜位置，最高极限位置应是能够准确地向对手的场地排放球的水平位置。为了确定连杆的长度，学生们花了几天的时间用圆规画了几十张图纸才完成。

上升机构

管道的上升机构如图 10.24 所示，M4 的长螺纹(300)杆直接与电机连接，螺母采用树脂材料。

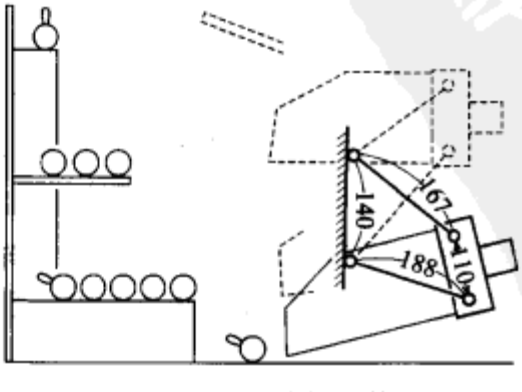


图 10.23 连杆机构

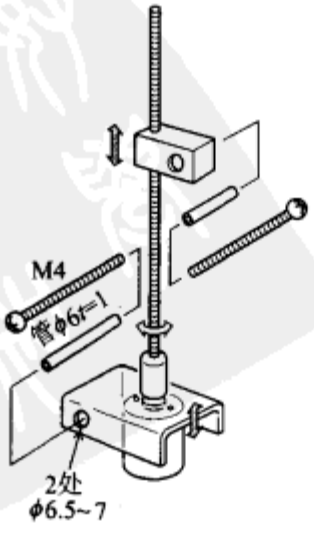


图 10.24 上升机构

自动停止装置

在管道的最高极限位置和最低极限位置安装了机构自动停止装置用的限位开关(b 触点),可使操作简单。这种装置在停止时不会产生角度误差,所以不影响瞄准操作。

制动电机

通常,机器人的行进方向(CW 和 CCW)和停止是通过切换各自的双刀双掷开关来控制左右 2 个直流电机。但是,直流电机不能够在开关切换的瞬间马上停止,还要因惯性继续转动。为了不产生惯性转动,采用了制动电机(在电机的端子间短路)。使用这种电机不会因操作者的操作能力和环境条件产生定位误差,并能够快速确定位置。开关使用日本开关器工业生产的扭转开关,双刀三掷瞬时 M20408(特卖品,5 个一组出售)。图 10.25 所示为其配线。

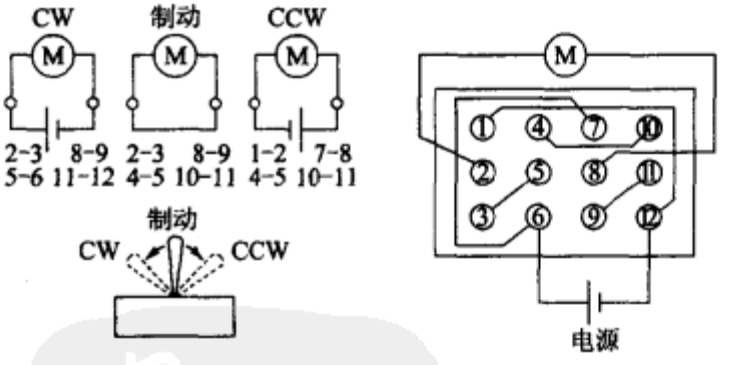


图 10.25　制动电机配线

保证练习时间

为了保证练习时间,机器人要在比赛的前 1 个月完成。要确定制作各零、部件的责任人,各负其责按时完成制作任务。装配也能够按计划完成,但动作和操作不合适的情况时有发生。在调试的过程中,提出了许多在设计和操作时没有注意到的操作方法和提高性能的方案。即使是在能够"梦想成真"的机器人制作阶段,也没有此时快乐,这种经验也是造物主给予人间的特权。通过每天的反复练习和改进,在比赛前的 2 周就已经能够像控制自己的手脚一样地控制机器人的动作了。

高级技术奖

参赛机器人中能够准确地瞄准的很少。获胜的机器人是通过臂杆使球下落后，用滚子大量收取和排放的机器“轰天”(山形工业高等学校)。

本校的机器人就得到了“在技术上运用了较高的技巧，充分发挥先进技术并取得了好的效果”这一评价，获得“高级技术奖”。如图 10.26 所示。



图 10.26 大会现场

竞赛参加者

指导教师：安孙子善一(机械专业)，芦野广巳(机械电子专业)

学生：浅黄丰和(机械专业 3 年级)；管道的设计和制作及各种接头的制作

五十岚靖幸(机械专业 3 年级)；风机部件的研究、设计和制作

斋藤学(机械专业 3 年级)；整流板的设计和制作及行走部分的制作

里见孝一(机械专业 3 年级)；外壳的设计和制作及电路的制作

增川直人(机械专业 3 年级)；四连杆和上升机构的设计和制作

(山形县立寒河江工业高等学校)

4　日本高中机器人竞赛大会

竞赛内容

竞赛的场地如图 10.27 所示，机器人是长和宽小于500mm、高度小于 600mm、质量小于 12kg 的有线遥控机器人。这种竞赛是用机器人将羽毛球投放到对方场地上的 7 个目标中得分，投中越多得分越高。图 10.28 是实际使用的场地。

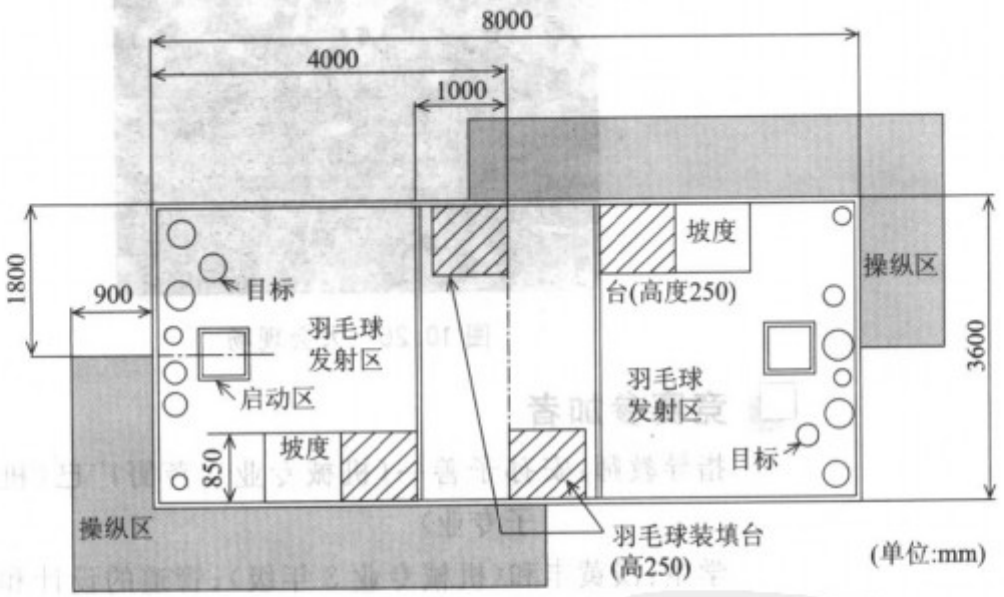


图 10.27　比赛场地简图

参赛者为操作员和助手 2 人一组，比赛时间是 3min。比赛双方要用自制的机器人将桥架射到羽毛球存放台，才能取到羽毛球，由助手向机器人内装载羽毛球。操作员将机器人移动到发射场地，瞄准对手的目标发射羽毛球得分。

每个场地中共有 7 个目标，根据直径和高度的不同设置了 3 种得分点。胜负是根据投入到对手目标中的羽毛球和落到对手场地中的羽毛球的总数决定，总数多者获胜。如果分数相同，则机器人的质量轻者获胜。需要注意的是，禁止有妨碍对手羽毛球进入自己场地的动作。

我们的机器人

图 10.29 是参加这种比赛的“遥控工程学队”的机器人，它主要是由驱动部分、羽毛球发射部分以及能够搭桥和断开桥的机构部分组成。驱动部分应能在比赛规定的时间内 3 次到羽毛球存放台去取羽毛球，为了能够发射 36 发，要注重旋转性能，简化结构，采用两轮驱动方式。羽毛球发射部分是采用两个轮子的摩擦发射方式，发射角度和发射速度是根据到场地边界的距离，通过实验得到的经验值设计计算得到的。

到目标的距离调整是由机器人前后移动完成的。设置在机器人前部的桥为 2 层结构，在分离的瞬间依靠弹簧力展开。这是因为必须架桥的两个台子的间距为 1000mm，而起动时机器人的高度限制在 600mm 以下，这种结构可以使起动后到达架桥的时间较短。由这些部分构成的机器人是平衡性好、性能可靠、操作性能佳的作品。

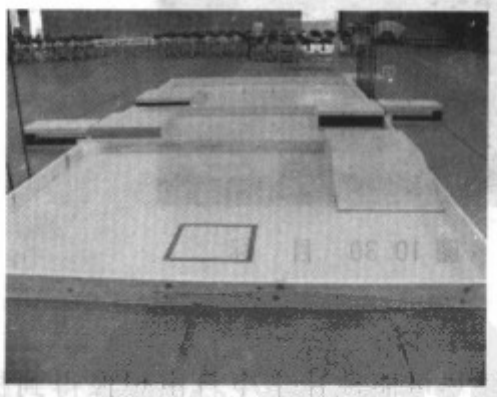


图 10.28 实际场地



图 10.29 机器人

与制作相关的事项

通过部活动安排

制作这种机器人是作为部活动的一个环节来组织安排的。除了主要的几个学生以外，在提出方案和购买制作场地的零件时，由全体同学共同完成。所以，能够取得比赛资格是经过所有同学的共同努力。

理解竞赛规则

这种比赛的题目每年都在变化，在每年的年初公布比赛规则。在着手设计制作之前必须充分理解比赛规则。另外，要想到在比赛的时间内如何展开机构是一个关键问题，

所以要从设计方案中选取用时为 3min 的方案，对方案也必须进行广泛充分地研究才能确定。

场地和目标

机器人制作完成后应在与实际比赛用的场地、羽毛球及目标相同的条件下演练。但在实际比赛中影响因素有许多，如场地地面的摩擦、坡的倾斜角度、羽毛球的飞行方向及落到地面时的反跳等。因受经济等条件的限制，不能够将所有的条件都按与实际相同的准备。我们准备了与比赛用同一型号的羽毛球，制作了与实际尺寸相同的目标，场地也尽可能制作得与实际相同。机器人就是在这种条件下反复演练。图 10.30 是练习时用的目标。

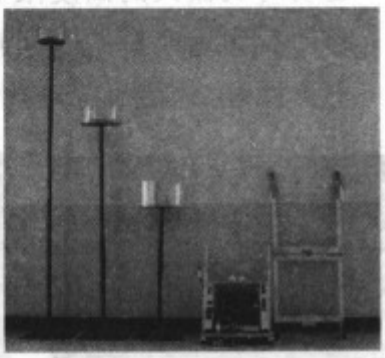


图 10.30　目　标

创意和设计

在方案设计阶段尽可能地让学生自由想像得到机器人的设计方案，但按这些设计很难完成实物。如车架和电机的位置、各驱动部分的干涉等，许多零件都不能安装到预想的位置。虽然试运行时反复出错，但最终还是完成了设计并开始制作。对仍然与设计不符的地方，就要重新设计、反复调整直至完成机器人制作。

机械加工

要准确制作机器人，机械加工是关键的环节。为实现具有重复性的平稳动作，各零件的加工精度应尽可能地高。根据零件情况使用的机床有车床、铣床和钻床等。图 10.31 是用铣床在加工机器人的齿轮箱。



图 10.31 用铣床加工齿轮箱

涉及的机电一体化技术

通过 CAD 设计

制作活动部件的关键是精密加工，为此需要有准确的设计图纸。利用 CAD 设计图纸能够检查各部分的干涉，修改设计和计算尺寸也比较容易。图 10.32 是使用 CAD 绘制图纸的部分视图。

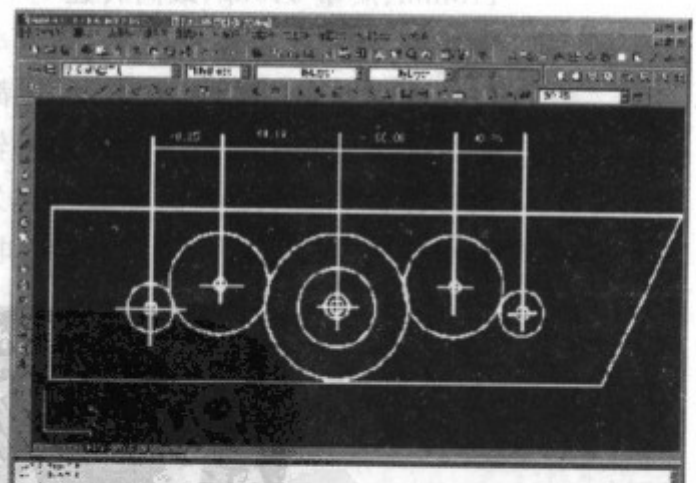


图 10.32 用 CAD 绘制图纸

简化机构

免维护

要求机器人能够自由转动，但在实际制作时，很难保证各机构在做同一个动作时完全再现。当机器人运转时，驱动部分、机构部分及车架的固定部分就会松动。**免维护**是理想的情况，设计机器人必须以维护为前提。另外，为了使操作简单、机器人的动作控制容易，机构就必须设计得简单。因此，这个机器人只制作“行走”、“架桥”和“发射羽毛

球”这些不可缺少的机构。车架的固定部分等连接不使用螺母，而是在车架上直接攻螺纹，用六角螺栓固定。这样可缩短维护时间。

有线遥控

有线遥控

比赛规定遥控必须是**有线遥控**。每增加一个动作就要增加相应的开关和配线。在这个机器人的控制器上有控制左、右轮转动的两个开关，分离桥的一个开关，发送羽毛球的一个开关，发射羽毛球的一个开关，这些都是自动复位开关。还有电机变速时用于电压转换的极限开关。

驱动直流电机

将桥展开时，除了使用弹簧以外，还要在所有活动处使用带齿轮的直流电机。这里使用的电机是瑞士 MAXON 公司制造的无心直流电机，这种电机是直径 35mm、长度 110mm、质量 340kg、最高转速 7070r/min、公称电压 15V、额定功率 90W 的高输出电机，其效率高达 81%，由于没有规定转动的方向，所以具有正、反转都可以使用这一优点。电机带的齿轮头为 1/4.8 的行星齿轮，为了满足要求，在车架内又设置了一个直齿减速装置作为二级减速。图 10.33 所示为羽毛球发射部分使用的直流电机和二级减速装置。

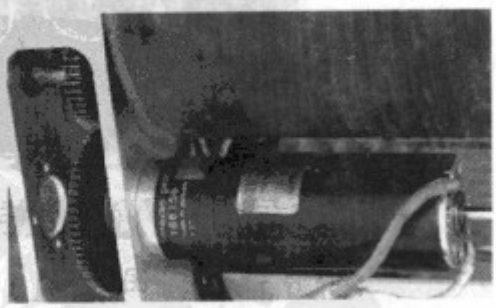


图 10.33　直流电机和二级减速装置

参加竞赛

大会由文部科学省主办，也是日本全国职业教育博览会的比赛项目之一，本次是第 12 届大会。日本全国有 192 个队报名参赛，集中了各种创意的机器人。如图 10.34 所示。

为了参加这个大会，要在各地区参加多次预赛或选拔赛参赛，完成度高的机器人才有资格参赛。所以，要从 192 个队中选拔出全新机构的机器人和有新创意的机器人等，

得分高的64个队能够参加决赛。虽然我校的参赛队没有能够参加决赛，但这却是一次难得的机会，可以从其他队学习到自己没有想到的思路、制作机器人的技巧等，不仅对于参赛的学生，对全体学生都是一次有益的尝试。

面对这种每年一个题目的大会，需要花费几个月的时间分析课题，确定目标。这可以培养学生必须具备的解决问题的能力。今后这种大会也将成为未来的机器人技术人员充分发挥创意和创造性的机电一体化的舞台。



图 10.34 大会现场

竞赛参加者

指导教师：小川忍（机械专业）

学生：三枝木祐人（机械专业2年级），木ノ内隆幸（电气专业1年级）

（神奈川县立神奈川工业高等学校）

5　日本职业学校机器人竞赛大会

竞赛内容

日本职业学校机器人竞赛

2004 年 12 月，第 13 届**日本职业学校机器人竞赛**大会（日本职业学校信息教育协会等主办）有以下 3 个项目的比赛。

自律型机器人软件项目

比赛是通过在规定的时间内（预赛 1 min，决赛 2 min）刺到的气球数来比较编程技术。在场地上分别涂了黑色和白色，由装在气球中的发光灯作为机器人发现气球的目标（见图 10.35）。障碍物以 1 s 的间隔交替点亮和关灭，机器人不能够与其接触，否则扣分。

自律型机器人硬件项目

比赛是统计在规定的时间内（预赛 1 min，决赛 2 min）将对手或障碍物驱逐出场的数目。在黑色场地的四周有白色的边界，障碍物的质量小于 2 kg（见图 10.36）。由速度和功率决定胜负。

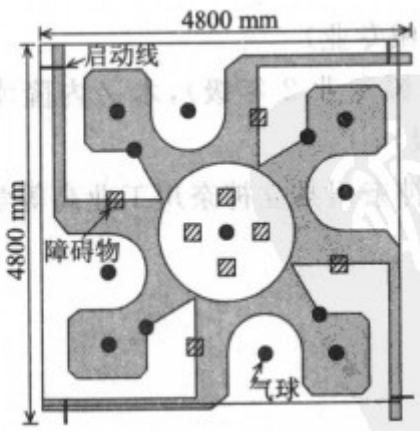


图 10.35　软件项目的场地

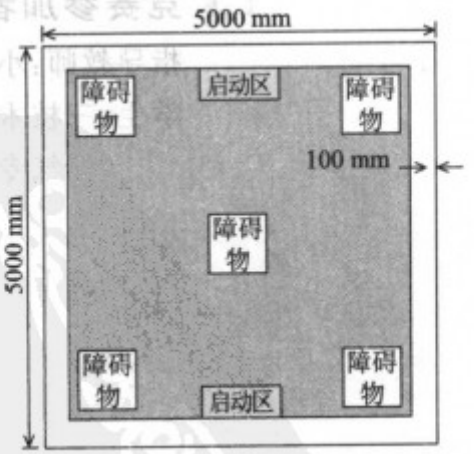


图 10.36　硬件项目的场地

有线型机器人项目

预赛要求机器人拾起放在地面上的 25 个卵形球，爬上倾斜角度约为 22°的斜坡，然后将球滚入孔中，根据滚入孔中球的数量决定胜负（见图 10.37）。决赛是机器人拾起放

在地面上的立方体(边长 200 mm),并将其搬运到场地中指定的位置上,根据搬运的数量决定胜负。在场地上允许机器人之间的碰撞,所以要求机器人的性能好,且控制技术高超。

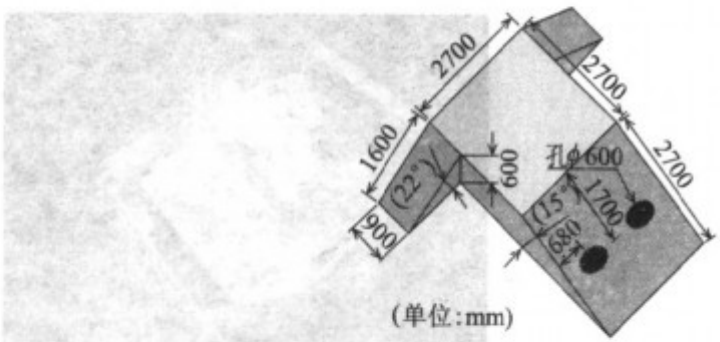


图 10.37 有线项目的场地

我们的机器人

软件项目

在前面安装了防止碰撞的缓冲器,侧面的缓冲器稍微倾斜安装可承受轻微的碰撞,缓冲器使用铝材加工制作。为了能够准确地刺到气球,将刺气球的针分别安装在正面和向左右倾斜的前方。驱动使用两相励磁**步进电机**,可准确控制机器人沿设定的轨道行走(见图 10.38)。采用的软件开发语言是**C 语言**和**汇编语言**。

步进电机

C 语言

汇编语言

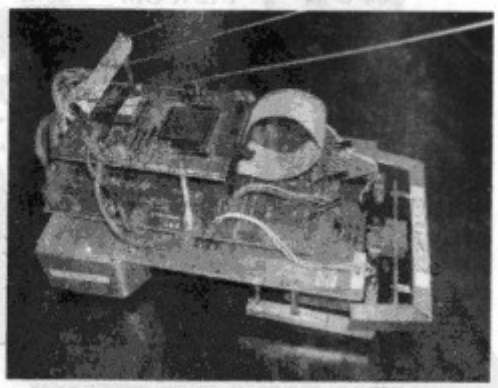


图 10.38 软件项目的机器人

硬件项目

在机器人的左右和前方安装了 5 个 **PSD 传感器**,用于检测对手机器人和障碍物。此外,还在车体的内侧安装了分辨地面颜色的**光敏传感器**。机器人的外侧全部被 5mm

PSD 传感器

光敏传感器

厚的铝板包裹，以此抵抗与对手的碰撞，前方还安装了长100mm 的阻尼板，可以保证能够将障碍物等推出场外。驱动部分采用大转矩电机，能够将质量在 4kg 以下的机器人推出场外(见图 10.39)。

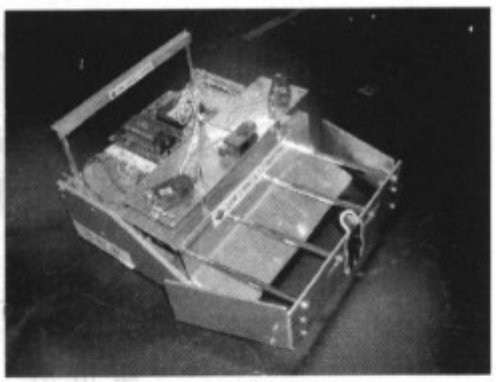


图 10.39　硬件项目的机器人

软件项目和硬件项目的机器人规格如表 10.4 所示。

表 10.4　机器人的规格

	软件项目	硬件项目
尺寸	200 mm×400 mm×350 mm	210 mm×300 mm×150 mm
质量	1 kg	3 kg
CPU 板	DENCOM　V25M	Best Technology V25
电机	日本伺服 KH42KM-801	日本伺服 DME34B37G61A
光敏传感器	东芝　TPS601A	浜松光产业　S4282-51
物镜传感器	OMRON　VX5-1A2	SHARP　GP2D12
电源	DC 7.2V (Ni-Cd)	DC 14.4V (Ni-Cd)

有线型机器人项目

由于起动时对机器人的尺寸有规定，将机械部分设计成在起动后能够前后展开的构造，能将卵形球和立方体两种形状不同的物体从地面上拾起，参见图 10.40 和图10.41。另外，考虑到要与对手机器人碰撞，按照降低机器人重心的思想，配置电池组和电机等质量大的主要机构的安装位置。

在选择其他结构材料时，也是从强度和低重心方面考虑，采用了铝方管。为了减轻操作负担、防止机器人可动部分被破坏，在动作的极限位置上安装**限位开关**来切断电机的电源。驱动电机采用了大转矩电机，**四轮驱动**方式，保证机器人能够爬上22°的斜坡。参见表10.5。

限位开关

四轮驱动

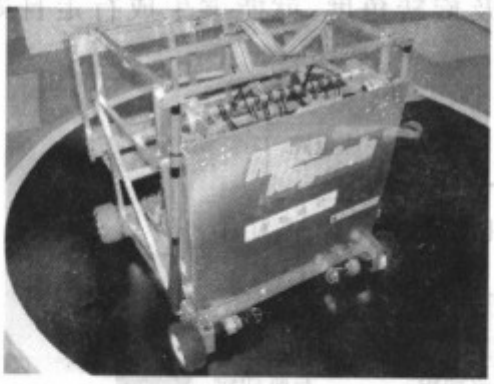


图10.40 有线型机器人

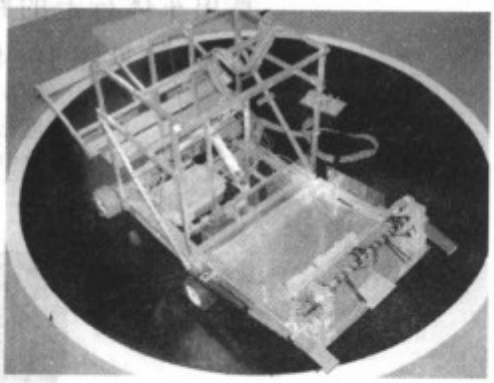


图10.41 有线型机器人(展开时)

表10.5 有线型机器人的规格

尺 寸 (展开后尺寸)	500 mm×500 mm×500 mm(500mm×1200 mm×500 mm)
质 量	15 kg
电 源	DC 28.8V(Ni-Cd)
驱动电机	maxon RE36
控制方法	遥控器

与制作相关的事项

将3个月的研发时间划分成下面的三个工程，各工程的时间分别是1个月。在课间和放学以后规定的时间内完成作业，但也必须按开发计划解决每一个技术课题，以保证按计划完成任务。

机器人的制作应在8月中旬完成，以便在暑假期间通过与其他学校进行的演练或地区预赛来调试机器人。

设计(试制) → 制作(加工和编程) → 试车(调试)

涉及的机电一体化技术

脉冲重复频率(软件项目)

为了提高控制性能和高速度化，步进电机的脉冲重复频率通过PIC(16F84)的程序有前进的6个等级200 pps、320 pps、440 pps、560 pps、680 pps、800 pps和后退的1个等

速度控制

异常振动

失步

级 200 pps。将速度控制指令设计为多变速的，可进行细致的**速度控制**，能够得到平滑的行走轨迹。这种脉冲重复频率的设定需要花费许多时间，按照事先想到的各种问题，通过试验得到不发生**异常振动**和**失步**的脉冲重复频率、加速和减速的时间。根据步进电机确定位置的精度，用程序计算出车体行走的距离及旋转角度，就能够生成行走自如的轨迹，参见图 10.42。

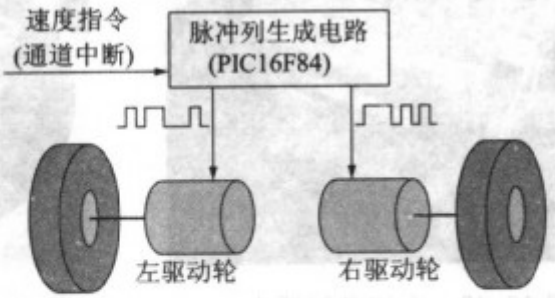


图 10.42　步进电机的驱动

PSD 传感器(硬件项目)

距离

模拟电压

使用光学测距方式的传感器组，根据检测出的**距离**输出**模拟电压**。根据电源电压，按照与障碍物的距离得到的输出电压为：20cm 时为 3V；80cm 时为 0.5V。日光灯等的干扰光、障碍物的形状和材质的影响很小，可以忽略不计。由于距离数据是通过模拟电压输出的，与 PIC 微机(16F876)的模拟输入端子相接，根据由程序测量的电压(A/D转换)来测定到达障碍物的距离，参见图 10.43。

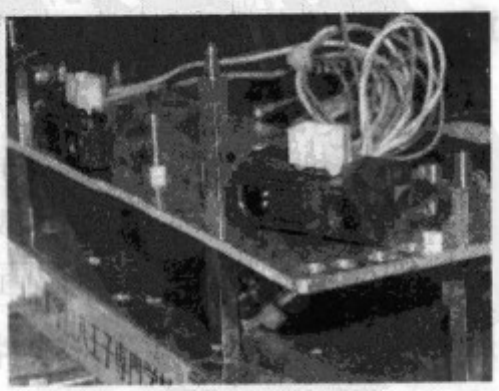


图 10.43　PSD 传感器单元

机械加工(有线型机器人项目)

对于机器人零、部件的加工制作,要求有较高的加工精度。特别是能够活动部分周围零件的制作,要使用 NC 机床,加工精度应达到 0.001mm。

NC 机床

参加竞赛

3 项目优胜

在日本全国大会上比创意和技术的是从全国各地选拔上来的 15 所学校的 64 个队。我们在决赛中经历了反败为胜的激烈战斗,在 3 个项目的比赛中全部获优,并取得了团体优胜。站在优胜队文部科学大臣奖的领奖台上,制作开发时的辛苦随之消散,如图 10.44 所示。在竞赛中,必须将所有的创意都融入仅有的资源(时间、预算、技术水平)中。在赛场上集中了"机器人开发"的志趣相同的伙伴,在相互激励中提高技术水平。将平时所学的知识全部倾注到一个机器人上时,才能够真正体会到在教室中学习不到的技术奥妙、乐趣、自己技术的极限等机电一体化技术。



图 10.44　表彰仪式

竞赛参加者

指导教师:若岛正敏,松浦源太郎,石川浩(机器人专业)

学生:软件项目——高野浩祐,玉木信之介,砂原隆树(机器人专业 1 年级)

硬件项目——谷口哲,山崎聪(机器人专业 1 年级)

有线型机器人项目——渡部洋平,三木芳郎,本田宏树(机器人专业 1 年级)

(日本工学院八王子专科学校)

6　微机遥控迷途通过竞赛大会

竞赛内容

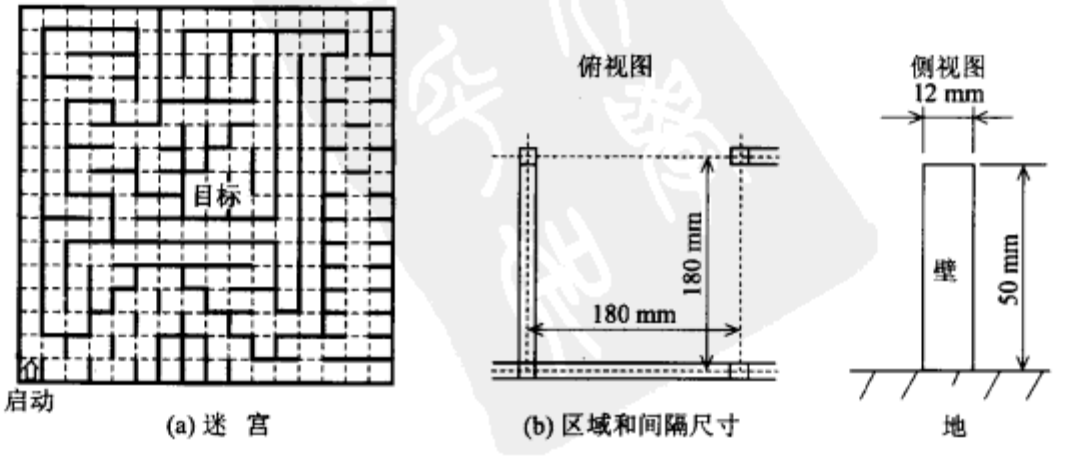
微机遥控迷途通过竞赛

寻找机器人竞赛

微机遥控迷途通过大会是自律型智能机器人的竞技会。这种竞技会除了核心的**微机遥控迷途通过竞赛**以外，还有初学者也能够参加的**寻线机器人竞赛**（见第 10.2 节）、使用键控的微机控制器竞赛。下面将简要介绍本校参加的微机遥控迷途通过竞赛大会。

微机遥控迷途通过竞赛是使用自律型机器人在迷宫内行走，是比较谁能够尽快到达终点的时间检验竞赛。竞赛的规则大致如下。

微机遥控迷途通过竞赛的迷宫如图 10.45 所示。该迷宫是由 16×16 的区域构成，每个区域的大小为 18cm×18cm。划分间隔的墙壁高度为 5cm，厚度为 1.2cm。起动区域在 4 个角上，行进方向为迷宫内的顺时针方向。终点在迷宫的中心，占 4 个区域。有无墙壁等的迷宫信息必须依靠机器人自己来收集。比赛规定的时间为 10min，行走 5 圈，记录由起动区域到达终点区域的时间。对于这种竞赛，分析迷宫的探测技术（人工智能部分）和控制机器人高速行走的控制技术（运动能力部分）的平衡是胜负的关键。另外，根据大会和级别的不同，对于规定的时间以及是否可以更换电池等都有详细的规则，所以必须了解清楚每次大会的详细规则。



(a) 迷　宫　　(b) 区域和间隔尺寸

图 10.45　微机遥控迷途通过竞赛的迷宫

微机遥控迷途通过2004(第25届全日本微机遥控迷途通过竞赛)微机遥控迷途通过竞赛的专家小组决赛的规则是,规定的时间为5min,不得换电池。制作参加微机遥控迷途通过竞赛的机器人需要传感器应用技术、电机驱动技术和微机控制技术等必要的知识,包罗了机电一体化技术的基本要素,是今后要学习机电一体化和准备向更高技术挑战的技术人员的最佳教材。也是能够符合技术人员水平的,乐趣和技术趣味无穷的竞赛。

我们的机器人

2004年度开发了"迪龙安M"、"熊2号"、"史密斯Ver. M"3台机器人,开发的机器人有下面的特点。

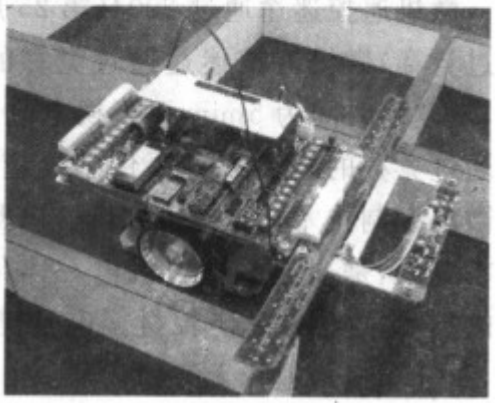
①"迪龙安M"是以初学者用的An F technical center公司生产的微机遥控迷途组件F0118b-M1为基础的机器人。

②"熊2号"是在本校的标准组件上增加了6个控制姿态用的模拟式光敏传感器,驱动系统使用薄型步进电机的机器人。

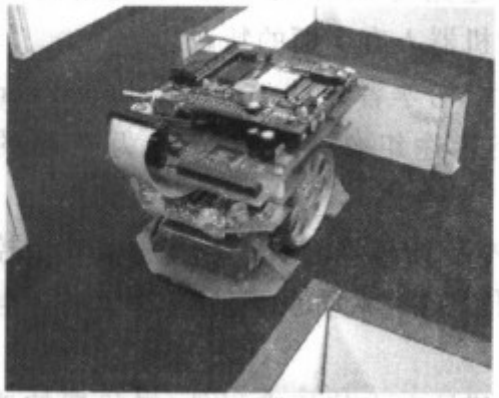
③"史密斯Ver. M"是在本校标准组件(微机遥控迷途通过委员会中部支部副支部长中岛史敬为中级选手设计开发的机器人)上的控制姿态用传感器(数字式光敏传感器34个)的基础上增加了1个陀螺传感器的机器人。

通过设定发挥各自特点的开发题目进行机器人的制作。由于"迪龙安M"使用了初学者用的微机遥控迷途组件,所以,开发课题只需在软件上下功夫,力图提高机器人的速度和性能;在"熊2号"机器人的构成要素中,质量最大的就是电机,主要通过采用薄型电机来降低电机的质量,实现高速转向是开发的课题;"史密斯Ver. M"则是通过采用稳定性高的数字式光敏传感器和能够反馈角速度的陀螺传感器来保证高速行走时的稳定性。

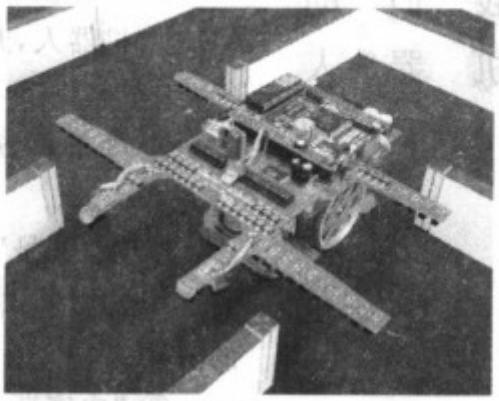
机器人的外观如图10.46所示。



(a) 迪龙安M



(b) 熊2号



(c) 史密斯Ver.M

图 10.46　机器人的外观

与制作相关的事项

虽然微机遥控迷途通过竞赛的历史已经超过 1/4 世纪，但是，竞赛的基本形式不变，始终是用自律型机器人破解迷宫到达目的地的方式。竞赛规则也基本相同，只是随着技术的不断进步有一些局部的调整。在这种竞赛上，高等级的选手水平非常高，所以，对于初学者的技术门槛就比较高。我校首先以标准组件为基础，使选手理解硬件和软件。在此基础上考虑新的方案，开发出更高性能的机器人。这次竞赛我们通过使用初学者用的组件实现高速度和高性能；在本校的标准组件上增加了陀螺传感器，以控制旋转角度；使用模拟式光敏传感器和薄型步进电机使机器人小型化和轻量化，最终达到高速化的目的。

涉及的机电一体化技术

机器人在迷宫行走时，必须不断地控制姿态使自己不碰壁。为此，首先机器人必须有在迷宫中的位置和姿态的信息输入，这是必要的传感器应用技术。然后是怎样理解传感器的信息并输出，这是使用微机的控制技术，也是核心技术。最后是由微机发出的控制信号来控制电机的驱动控制技术。

迷宫探测计算

除上述技术以外，还需要有机器人的构成、操控方法和驱动方法等机械和机构方面的技术。**迷宫探测计算**是使机器人能够理解迷宫、找到到达终点的最短时间路径的软件技术，所以，迷宫探测计算对提高探测效率和最大限度地发挥机器的性能是非常重要的。

传感器技术

这次开发的机器人采用光敏传感器(数字式和模拟式)和陀螺传感器作为位置和姿态用传感器。光敏传感器能够检测机器人到达墙壁的距离；陀螺传感器能够检测机器人本体的角速度。

(1)数字式光敏传感器

数字式光敏传感器

数字式光敏传感器是利用红外光反射器等检测有无墙壁的传感器。在“史密斯 Ver. M”上有检测前方和左右墙壁的 34 个传感器。图 10.47 是一组传感器的电路，该电路的动作如下。

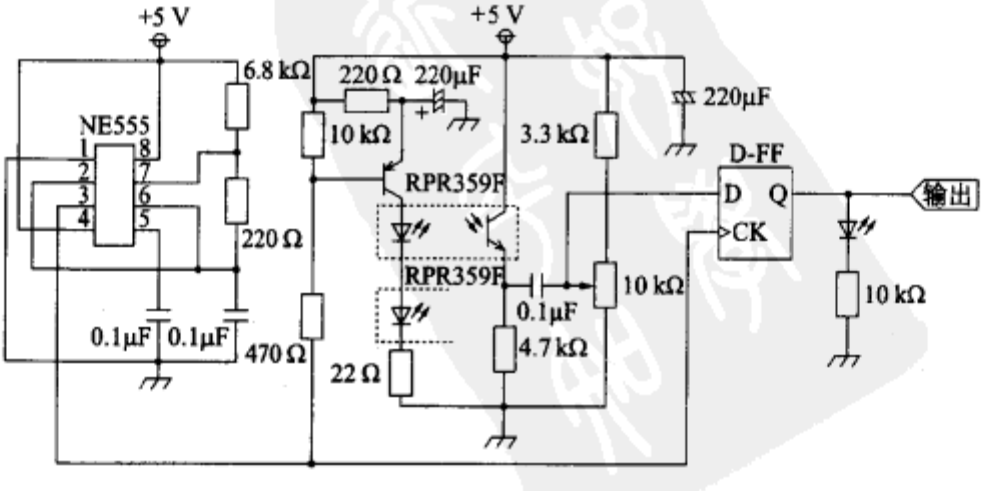


图 10.47　数字式传感器电路

① 由定时器 IC(NE555)制作负脉冲信号。

② 通过晶体管使 LED 发光。

③ 由光电晶体管接收反射光。

④ 根据发光结束的定时和 D-FF 保持受光信号。

⑤ 微机从接口输入传感器的输出信号 OUT(数字信号)。

(2)模拟式光敏传感器

模拟式光敏传感器

模拟式光敏传感器是将 LED 的光照射到墙壁的侧面，作为距离数据的反射光强度，是模拟值的传感器。在这次制作的机器人"熊 2 号"上配置了 6 个传感器，用于检测前方和左右墙壁及斜方向行走使用。图 10.48 是制作的一组传感器的电路，该电路的动作如下。

① 由微机发送 LED 的发光信号脉冲(周期 1ms，脉宽 5μs)。

② LED 发出强光。

③ 由光电晶体管接收反射光。

④ 由聚光器转换稳定光成分，得到反射光成分。

⑤ 通过运算放大器得到传感器的输出信号 OUT(模拟值)。

⑥ 根据发光结束的定时，微机将传感器的输出信号 OUT 经过 A/D 转换，得到距离数据。

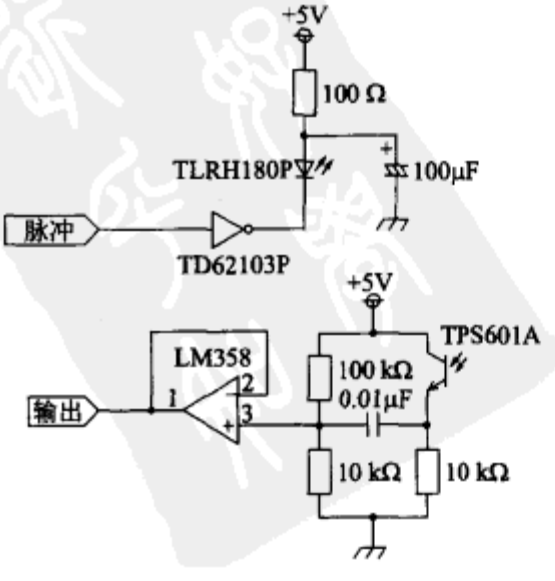


图 10.48　模拟式光敏传感器电路

(3)陀螺传感器

陀螺传感器

陀螺传感器是使用村田制作所生产的压电式陀螺ENC-03J的传感器。传感器的输出是机器人本体的角速度,通过积分运算能够得到角度。制作的电路如图10.49所示。在这个电路中,输入传感器的输出电压U_{out}和基准电压U_{ref}是模拟值,通过微机取两者之差可求出角速度。

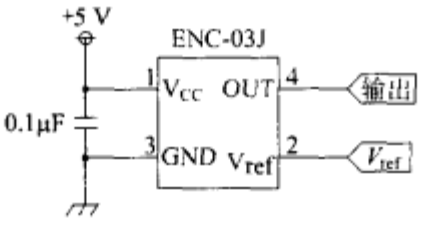


图 10.49 陀螺传感器电路

微机控制技术

根据传感器的信号读取机器人的位置和姿态信息,对姿态进行控制。主要的处理有每隔一定时间输入到传感器的信号,在一定的距离内对姿态的控制。

机器人的行走可分为以下4种方法。

直线行走

① **直线行走**:一直按直线行走。

斜线行走

② **斜线行走**:阶梯状的路线按斜线行走。

就地旋转

③ **就地旋转**:机器人处于停止状态,通过左右轮反转转弯的方法。

回转

④ **回转**:按弧线平滑转弯的方法。

直线行走通过PD控制能够实现稳定的姿态控制;斜线行走通过微柱控制,能够按阶梯状的路线在斜线上行走,并可通过狭小的间隔;就地旋转是用通过电机的步长数来控制旋转角速度,转向几乎无误差;回转是对回转的角度进行控制,在连续回转时也无累计误差。对以上几种方法的复合控制是通过计算机实现智能化的。

微机主板使用JSD公司生产的V25P10。这种微机主板能够提供可以使用C语言的printf函数和scanf函数等标准输出函数的远程调试程序,对于习惯了DOS操作的技术人员是具有魅力的开发环境。C语言使用的是波兰公司的编译程序Turbo C++ Ver.1.0。

电机驱动技术

我校机器人使用的是单极型HB步进电机。通过12个4型Ni-MH电池将电压14.4V(公称)提高一倍。使用三原

公司生产的电机驱动 IC SLA7033M 的恒电流斩波电路，控制电流保持在 1A/相。设定电机的电流除了使用电位器可调节以外，也可以用程序进行控制。另外根据需要，有时也要切换到 1-2 相或 2 相励磁方式使用。步进电机的驱动电路如图 10.50 所示。

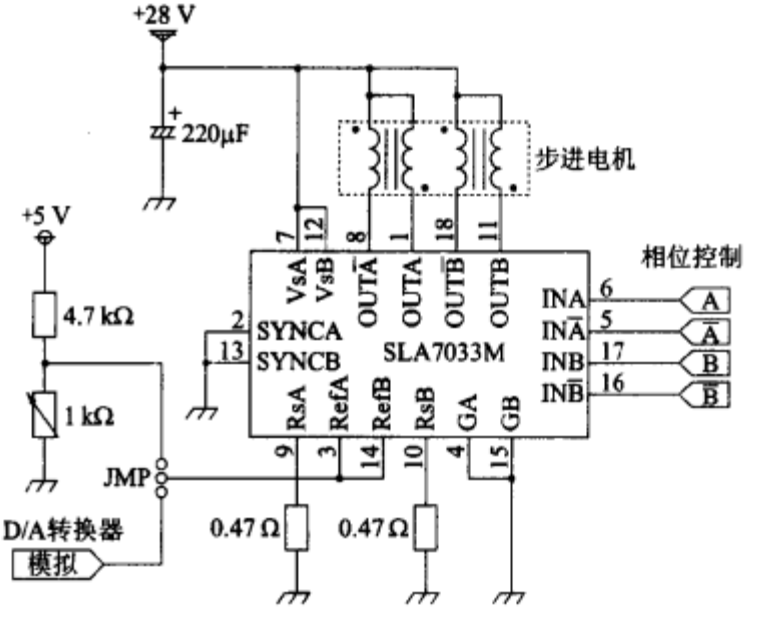


图 10.50　步进电机的驱动电路

机械和机构技术

机器人的物理构成（传感器和电机等的配置）是能够显著改变机器人特点的要素，我校采用了初学者容易控制的标准配置。两个电机背靠背安装，采用驱动轮直接与电机轴装配的直接传动方式。光敏传感器则安装在能够检测出前方和左右墙壁（倾斜装配）的位置上。“迪龙安 M”、“熊 2 号”、“史密斯 Ver. M”的构成及传感器的配置见图 10.51。

软件技术

微机遥控迷途通过竞赛需要有好的探测算法和战略。在竞赛中不仅需要控制行走姿态，在交叉口处也必须会根据机器人的当前位置和方位角判别行进方向。这种判别是为了发现离终点最近的路线或更适合的路线。有时会因为剩余时间或电池电量不足，没有找到最适合的路线而中途返回，所以常需要根据具体情况改变战略。将这些设想程

序化的就是软件技术。

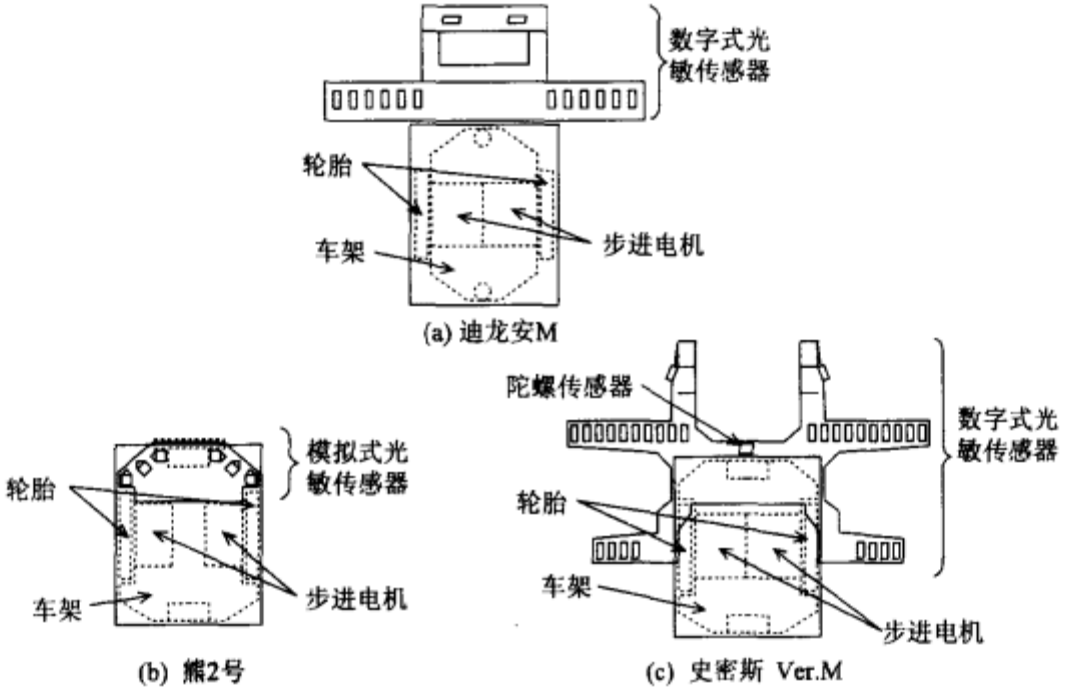


图 10.51　机器人的构成及传感器的配置

我校机器人采用的探测算法是向心法之一的足立法(首先按能够到达目的地的假想线路行走,如果在假想线路上遇到墙壁不能行走时,则按新的假想线路行走的方法)。另外,在到达终点后,还可进行探询最佳路径的试行走,如果在一定的时间内没有新的发现,就要返回起点位置。计算出此时能够推测出的最佳线路,进行第 2 次行走(在探测行走后要用全速行走)。

参加竞赛

我校的目标是在全日本大会上进行的微机遥控迷途通过竞赛中取得好名次,将题目交给学生进行开发。为参加全国大会经历了微机遥控迷途通过中部地区初级者大会、微机遥控迷途通过中部地区大会、全日本学生微机遥控迷途通过竞赛大会。另外,在 2004 年,还作为日本学生代表参加了在新加坡举行的亚洲大会。参赛结果如下。

• 第 19 届微机遥控迷途通过中部地区初级者大会冠军,亚军。

• 第 23 届微机遥控迷途通过中部地区大会第 3 名(教师),第 5 名,第 7 名。

·第 19 届全日本学生微机遥控迷途通过大会冠军，第 3 名。

·微机遥控迷途通过 2004(第 25 届全日本微机遥控迷途通过大会)。

微机遥控迷途通过竞赛专家级第 8 名，第 10 名。

微机遥控迷途通过竞赛新手级第 9 名。

·AIC AGAMES MICROMOUSE COMPETITION 第 4 名。

到 2004 年，我校已经是连续 8 年在全日本学生大会上取得了 9 个冠军。进行机器人开发的所有学生都实现了在全日本大会上取得好名次的目标。尽管如此，应该说最大的成果是，通过牺牲了假期的学生们的共同努力，发挥出作为技术人员应有的潜力，提高了教学的效果(见图 10.52)。



图 10.52　制作机器人的学生(在微机遥控迷途通过 2004 的会场上)

机器人制作者

指导教师：左藤敏幸，长谷川和宣，安藤春行

学生："史密斯 Ver. M"；竹本隆一(控制工程专业(现在的机器人专业)2 年级)

"熊2 号"——稻熊彰(综合控制系统专业(现在的机电一体化研究专业)3 年级)

"迪龙安 M"——高味宏行(综合控制系统专业 3 年级)

(名古屋工学院职业学校)

7 日本高等职业学校机器人竞赛

竞赛内容

创新比赛
全国高等职业学校机器人竞赛
ROBOCON

这种竞赛的正式名称是**创新比赛·全国高等职业学校机器人竞赛**，俗称 **ROBOCON** 更具有亲切感。全国 63 所高等职业学校代表的目标是在两国国技馆举行的全国大会，这是相互间对自己掌握的知识和经验、技术及想像力的竞赛。每年电视都会播放比赛的实况，所以观看比赛的途径有多种。

比赛是以选拔赛的形式进行，各学校参赛的为红、蓝两个代表队，分别用自己制作的机器人进行比赛，在 3min 的比赛时间内决定胜负。要求必须按规定的质量、尺寸及规定的资金上限制作机器人。这种比赛的特点不仅是比胜负，也包括创意和技术水平，比赛设置了高于冠军的机器人控制大奖。

比赛的题目每年都不相同，每次都有新的技术和创意，观众暂且不论，主要是想让制作机器人的学生感觉到新鲜和充满魅力。题目要求的水平有逐年提高的趋势，近些年出现的大型且复杂的机器人，具有能够操控自如的驱动机构、无线操纵及自律控制等，所有这些都离不开机电一体化技术。

历年的题目例举

2003 年度的题目是“鼎”，见图 10.53。比赛是用机器人向赛场中的转盘上投放“重物”，依靠重物的重量使转盘向自己队的一侧倾斜。在竞赛场上，设置了 3 个转盘，将要放到转盘上的重物有球形和立方体两种，重物上粘贴了自动锁扣。竞赛结束时，向自己队一侧倾斜的转盘数多的队获胜。要想接触“重物”必须从台阶通过，下到赛场上一次。机器人在竞赛开始时的质量和尺寸不得超过 25kg，长、宽、高为 1200mm×1200mm×1500mm。

2004 年度的题目是“马斯修”，见图 10.54。这个比赛是自动机器人的对抗赛，机器人为营救在火星的奥林匹斯山上遇难的探测器“漂泊者”，要先到达无事峰顶。机器人首

先要按动救援机“使者”上的开关，使其起动，护送“漂泊者”到达峰顶的目的地。“使者”分别放在场地上的两个位置，是自律型机器人。最后，“漂泊者”距离峰顶近的一方获胜。机器人在竞赛开始时的质量和尺寸不得超过 20kg，长、宽、高为 1200mm×1200mm×1500mm。使者的边长 900mm，质量不限。两者在起动后均可以展开。

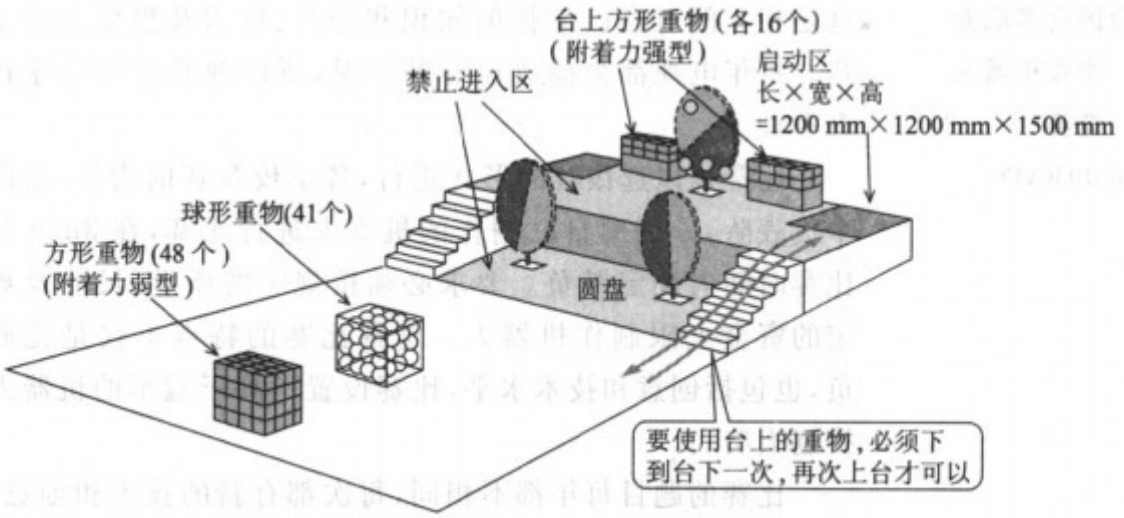


图 10.53　2003 年度“鼎”的比赛场地简图

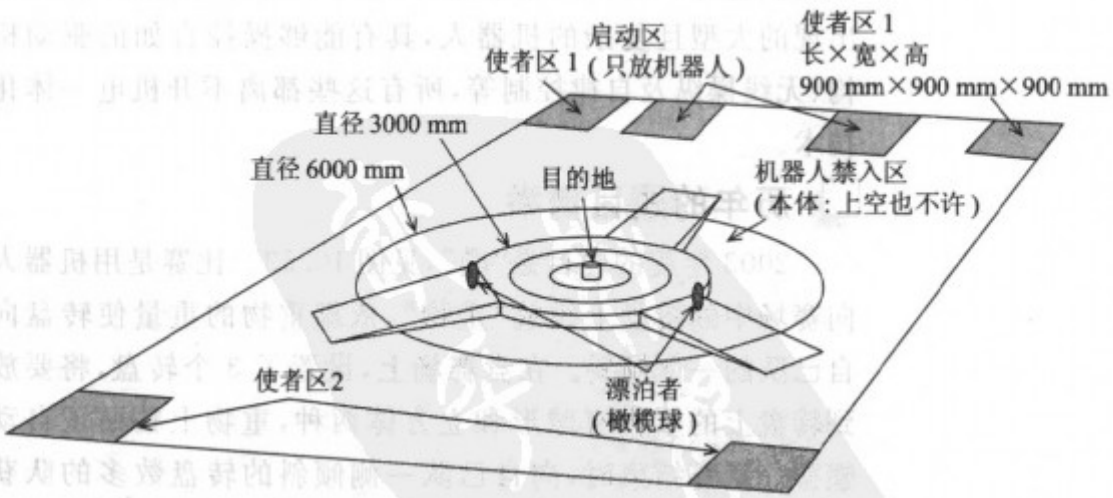


图 10.54　2004 年度“马斯修”的比赛场地简图

由这两个例子可以发现，2003 年度的题目倾向于机动性和创意，而 2004 年度，动作和自动控制的准确性则是成败的关键所在。哪一点重要？应如何实现？分析规则，领会本质，创造出崭新的构思，这些都与胜负密切相关。

我们的机器人

大食钢铁人

根据该年度的题目可将机器人按性质划分成两种，一种为下到比赛场地后一直在场地上活动的下方胜负型，另一种是下到场地后再返回台上的上方胜负型。上方胜负型的机器人必须具有爬楼梯的技术能力，台子上的方形物体是球形物体质量的2倍，并且附着力强。所以，制作上方胜负型的机器人应比较有利。

但是必须清楚，有实力的队几乎都选择了上方胜负型，所以我们选择了以下方胜负型为主的通用型。这是因为，不到比赛之日是不清楚对手的机器人是哪种方案。我们制作的机器人如图10.55所示，具有足以在下方获胜的攻击力，并且登上台子后也有获胜的可能，有了这种通用性，就可以根据对手的情况采取灵活的战略。

为了在下方获胜，机器人必须具有突出的攻击力。如何将方形和球形的重物都能够高效率地在短时间内拾取是需要解决的问题。经过多次试验的结果，选择的方案是模仿清洗帘状薄板的刷子滚动的方法，最后，成功地以全速在10s内将所有的球形重物全部拾取，参见图10.56。



图10.55 大食钢铁人
（贪吃的生化电子人，2003年度）



图10.56 拾取机构
（模仿清洗帘状薄板的刷子滚动）

能够大量地拾取，但却不能够利用也是没有意义的。这次，我们选择了打出方式，控制好滚子的速度，将重物准确地投射到转盘上。另外，滚子的长度要足够长才能够大量地射出重物，参见图10.57。



图 10.57　打出机构

自由野郎

由于胜负基本上是由自动控制的使者决定，所以，使者的制作将直接影响胜负。实际上，不仅要具有优秀的功能，也不能断绝因动作不良或误动作而后退的后路。对于抢占表示顶峰的标记点，考虑了从地面进行和空中进行这两种方案。特别是从地面进行时，要比对手抢先到达标记点是方案决胜的关键。因此，我们的机器人(见图 10.58)在启动后立即前进，敏捷地展开伸到标记点的轨道，参见图 10.59。然后，用设置在侧面的手臂捕获漂泊者，通过轨道上的传送带运送(见图 10.60)，是快速攻击型的机器人。



图 10.58　自由野郎
(自由人，2004 年度)

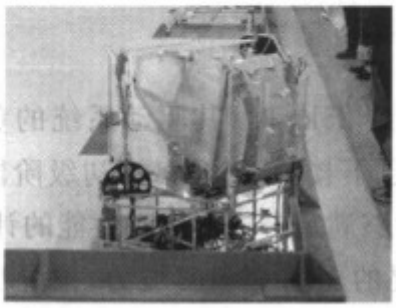


图 10.59 后 侧
（设置在侧面的手臂捕获漂泊者）



图 10.60 展开时
（在标记点的附近传送漂泊者）

与制作相关的事项

近几年来，机器人竞赛的关键是创意的独特性和优秀性，同时也包括以下技术。

创 意

别人想不到的新颖性固然重要，但必须是对实现其目的具有良好效果的创意，这一点非常重要。如果仅仅只是新奇就没有太大的意义。要想得到新颖和效果同时兼顾的创意极其困难，在其背后是时间和努力，这才是极其可贵的。

速 度

因为要在规定的 3min 内决定胜负，所以速度是至关重要的因素。移动机构暂且不论，为了提高手臂和拾取机构等部位的速度，增加更多的活动和作战时间，就要将所有的侧面都用上。但是，如果强度和电力不足，就会增加不稳定性，所以方案必须要考虑成熟。

可靠性

保证有目的的动作能够准确无误地进行是非常重要的。例如，如果手臂的角度仅仅偏离了 1°，本应该抓住的球这时就抓不到。有时也会因为 1 个螺栓的松动而不能够动作。因此，要 100 次，甚至 500 次地反复试验，修改错误，直至能够保证准确地动作为止。假设 100 次中有 99 次成功，仅有的 1 次失败就有可能发生在比赛当中，造成输掉比赛的结果。所以，必须保证做 100 次试验就有 100 次的成功。

在比赛场上，会因为有超过千人的观众而感到紧张，而出现平时没有考虑到的错误。因此，必须事先作好充分准

备，制定出周密的计划。

涉及的电气技术

驱动方法

如果机器人的质量达到 25kg 时，其驱动系统的负担就已经很大了，况且还需要上、下楼梯。这时，在初级阶段要给予明确的指导，必须进行能够满足必要的运动性能的计算。

因此，我们计算出需要的驱动力和爬坡力，推导出产生足够转矩需要的减速比和电机，然后自己动手设计满足条件的减速器。与使用标准产品不同，因为是根据实际减速比计算的，所以，如果设计稍有变化，就可以立即应对。

配线系统

当机器人处于爬坡等阶段时，驱动系统的负担相当大，会产生瞬间的大电流。因此，必须注意在配线的截面积或长度考虑不足时，容易产生电压降的问题。另外，安装了能够将瞬间电压提高 2 倍的电路、决定胜负时能够得到大输出的蜗轮回路。为此，控制系统也必须采取散热措施，在控制电路的大型晶体管和 3 爪调节器上配备散热器。但是，即使如此也有烧损的情况发生，所以，驱动系统的主体多采用继电器。

控制系统

最近使用超声波传感器和接触传感器反馈的较多，特别是在 2004 年，因为必须使用自律控制，在确认赛场地形和准确动作时，使用这种传感技术是非常重要的。另外，其他学校也有使用其他高级技术的。使用旋转编码器得到车轮的旋转量来控制自己的移动轨迹，能够准确地到达目标位置；使用距离传感器来躲避移动过程中的障碍物；通过使用图像传感器判别颜色等。

控制器

如前所述，必须进行远距离操作，又不能够使用一般的电波，所以，近年来几乎都是使用红外线遥控操作。由于现在红外线已经模块化，且大多使用相同的频带，信号窜扰就不可避免。因此，不仅是我校，其他各校也都有将自己的暗号或将识别码编入程序中，这样就可以解决信号窜扰的问题。另外，接收信号时也必须考虑不受电视摄像等强照明

的影响，一般是在感光部分覆盖一个只允许红外线通过的胶片等方法。

参加竞赛

2003 年度，我们获得了地区冠军，在全国大会上也取得了亚军的好成绩。另外，大量拾取和大量打出的创意受到好评，还得到机器人控制大奖。

2004 年度，我们是地区大会的亚军，获得了参加全国大会的出场权。与前一年顶着很大的压力相反，学生们经常是粗心大意，所以导致在全国大会上事故多发，第 2 回合就败了下来。

回顾比赛

通过比赛，最深切的感受就是稳定是最重要的。特别是在 2004 年必须使用自律控制动作时，很小的不稳定和误差就是致命的。例如，路面的摩擦因数有微小的变化就会使直行性紊乱，对目标就是几厘米的误差。如果这几厘米的误差在自律控制中不能够修正，其结果也是致命的。

无论在什么情况下，面对什么样的对手，如果不能够保证 100%的成功，就没有获胜的把握。所以，在比赛之前必须将所有的情况都考虑到，并有相应的对策，比赛时不能马虎。每天都在全力为机器的稳定而努力才是取得胜利的首要技术。

仅仅一次的失败就会将几百日的数千小时的努力化为泡影。但是，这种辛苦和努力的结果是自信和成长，这是获得胜利所不能给予的，对大家都是一笔宝贵的财富。

相信今后这些学生们还将会面对挑战，挑战带给学生的是新的经验和财富，由衷地祝愿他们。

机器人的制作者

指导教师：深谷直树（机械工程专业），石川智浩（电子工程专业）

学生："大食钢铁人"——南云稔也，海老根亮（机械工程专业 3 年级），斋藤晓（航空工程 3 年级）

"自由野郎"——小林宏光，中村力（机械工程专业 3 年级），栗田英介（电子工程专业 3 年级）

（东京都立航空工业高等职业学校）

8　ROBO-ONE：双足步行机器人竞赛大会

竞赛内容

ROBO-ONE

ROBO-ONE 是 ROBO-ONE 委员会主办的双足步行机器人的格斗竞技大会。召开大会的目的是要将机器人的乐趣带给更多的人，其宗旨如下。

大会在客观上要使机器人和比赛具有乐趣，竞赛的机器人要能够激发起参与者的欲望。因此，比赛注重的是技术的新颖性和娱乐性，而不是比赛的胜负。另外，为了使机器人技术普及和健康地发展，要尽可能公开技术情报。

ROBO-ONE 竞赛

ROBO-ONE 竞赛是比较新的机器人控制，在 2002 年 2 月召开了第 1 届。这种竞赛大会每年召开 2 次，出现在第 1 届大会上的机器人勉强能够行走。但到了第 2 届大会，已经出现能够自主站立起来的机器人，在第 3 届大会上这些都已经不足为奇了，所以这是技术进步最为显著的竞赛。因此，竞赛规则也是高于技术进步而每届更新，但基本上是身高 20～120cm 的双足步行机器人。要想参加大会，必须按竞赛规则制作机器人，并通过预赛前的资格审查。资格审查的题目随着召开次数的增加而越来越严格。最初是从能够步行开始，到能够站立起来、屈伸运动、侧行，直至必须能够登上 3cm 的台阶。到了第 7 届，机器人必须进行 2min 的自律动作，动作包括上述课题和演奏。大会的特点是不以在格斗竞技中获胜为最终的评分标准，不仅要加上在预选 2min 演奏的得分，而且还要具有独创性。图 10.61 是比赛场地。

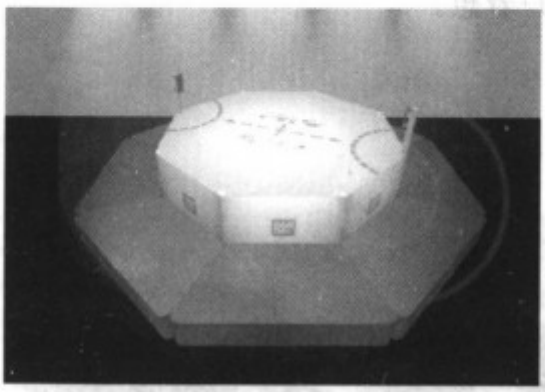
ROBO-ONE on PC

ROBO-ONE Special

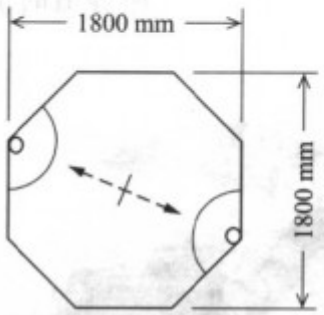
除格斗竞技以外的竞赛会，还有 2003 年 10 月召开的 **ROBO-ONE on PC**，2004 年 2 月召开的 **ROBO-ONE Special**。

ROBO-ONE on PC 的竞赛是比较在计算机上模拟的准确性。课题要求机器人要满足 ROBO-ONE 规定，在假想的月球表面的环境下，能够行走，飞跃两条沟壑。这种竞技不必精通最先进的控制理论，就能够得到有关科幻机器人的实际知识。设计使用的软件如下。

① 3D CAD：Autodesk 公司 Inventor。



(a) 比赛场地



场地外形尺寸 1800 mm×1800 mm
(正八角形)×高度600 mm

(b) 场地尺寸

图 10.61 ROBO-ONE 的舞台

② 运动分析和结构分析：MSC 公司 visual Nastran 4D。

③ 控制系统设计：Simulink Stateflow (Matlab)。

Special 的竞赛使用满足 ROBO-ONE 规定的机器人进行。

① Stairs：比较上下台阶的时间。

② Ball：将乒乓球投向靶子，比较准确性。

③ Dash：机器人从俯卧状态站起来后，向反方向冲刺，比较所用的时间。

④ Eagle：是运动性能的竞技。从下垂的管子上下来、走过转盘、台阶及跷跷板等障碍物，比较所用的时间。

⑤ Door：机器人要将门打开并通过，比较所用的时间。

我们的机器人

图 10.62 所示的“Σ”是在第 2 届 Special：Ball 竞技中获奖的机器人。图 10.63 所示的“Petit”和“Caro”是为参加第 8 届大会正在制作的模型。“Σ”是 2003 年 11 月开始开发制作的机器人，“Petit”是 2004 年 11 月开始试制的。由表 10.6 可以看出经过大约一年时间的技术进步情况。

与制作相关的事项

制作科幻机器人不只局限于 ROBO-ONE，这是机器人工程师的梦想之一。虽然正在研发之中，但也想将实现梦想需要的技术介绍给读者。

伺服电机

由于无线控制用伺服电机的转矩不断增大，所以齿轮系统也要采用金属制造使其具有较大的刚度。另外，控制方式的数字伺服化，也要求在设定伺服的稳定性、速度和响

应等值时能够为用户着想。

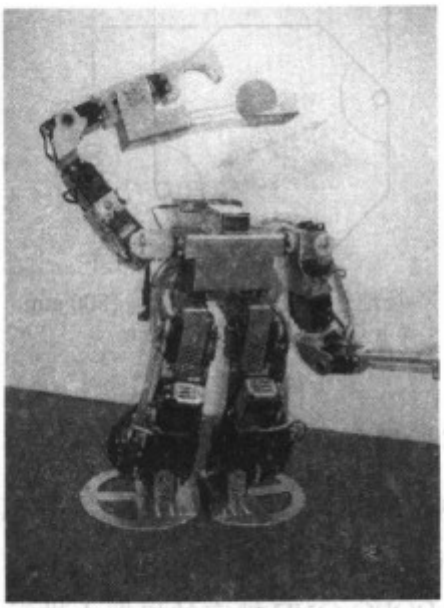


图 10.62　ROBO-ONE Special：Ball 竞技中的“Σ”

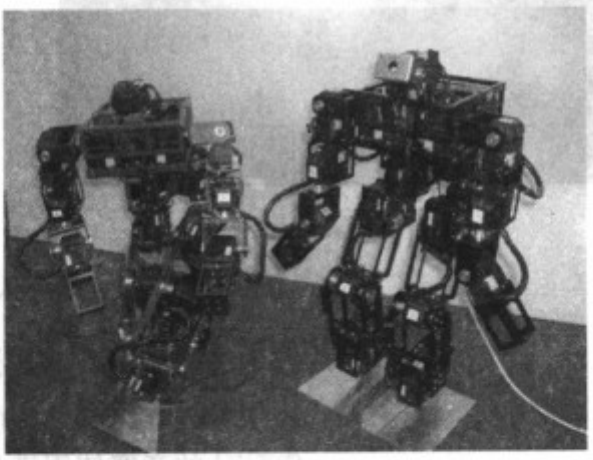


图 10.63　装有双足的 Petit 和 Caro（在均匀小台阶上也能够步行）

表 10.6　新旧科幻机器人的对比

	Σ	Petit
身长/mm	350	420,500(带传感器)
体重/g	2400	2300
自由度	20	23
控制器	UNICON	BRAINS 公司 mmEye-M
CPU	PIC	SH-4(200 MHz)
执行装置	近藤 KRS2346ICS	ROBOTIS DX116. 117
转矩/N·cm	196	206～265
动作角/(°)	180	300
速　度/(s/60deg)	0. 16	0. 094～0. 125
质量/g	56. 7	66
电池 CPU 伺服电机	006P 型 Ni-MH 电池 Li 聚合物 2200 mA·h	与伺服电机共用 Li 聚合物 2200 mA·h
内部传感器	无	足反力：微力 旋转角速度：振动陀螺仪 倾斜角：2ch 加速度传感器
外部传感器	无	CCD 相机 雷达传感器

控制器

RC用伺服电机可以说具有通用功能，是适合业余爱好者制作科幻机器人的动力源。但是，要使多达20个的电机精确地同步动作是非常困难的。为ROBO-ONE使用而开发的控制器是能够实现小型、轻量化和低耗电量的多通道电机控制器，具有可使用辅助操纵台等的扩展功能，扩展后尺寸大约为48ch。还有容易开发的合成运动用软件。即使不了解机器人用脚步行的复杂的控制规则，通过使用这些功能也能够开发出机器人必要的动作。

电　池

电池必须小型、轻量化，充电量大，能够大电流放电且循环更新。图10.64所示的锂聚合物电池，没有与充电量减少有关的“记忆效应”，可以说是适合ROBO-ONE的电池。但缺点是价格高，不能够承受过放电。

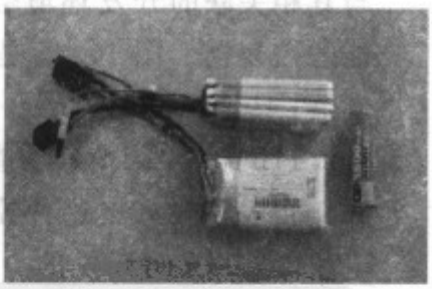


图10.64　47.4V的锂聚合物电池的容量为2200mA，质量为100g

3D CAD

即使得到性能高的零、部件，如果不能够进行合理配置，发挥其有效功能，机器人也是不能动的。设计科幻机器人时，最重要的是如何配置自由度和能实现其运动特性的关节构造。其次是对机器人躯干进行应力分析，确定各零件的材质、形状和壁厚等。在这一阶段还要注意，设计要考虑容易维护、不易产生振动及确定合适的重心位置等。

使用3D CAD可以设计形状复杂的零件，3D显示这些零件的装配，并可应用零件干涉检查功能和重心位置检查等功能，从而快速高效率地进行设计。

涉及的机电一体化技术

以新型机器人 Petit 为例进行说明。

躯 干

对躯干的要求主要是质轻且坚固，还有来源广泛和加工性能好等。使用材料的基本性能要求是比强度高，ROBO－ONE 是竞技性质的比赛，必须要具备特别强壮的躯干。现在，躯干使用的材料主要是铝合金。不久的将来，碳纤维(CFRP)、镁和耐热高性能树脂等材料也可根据零件所受的应力情况选择使用。

组装后常见的问题有不能够顺利地动作和产生剧烈地振动等。其原因有因加工精度不够产生的间隙、摩擦大或刚性不足、控制系统的增益和脉冲调制时间等问题，大多是特定的困难情况。有时也是上述情况综合作用的结果。

控制器

表 10.7 是控制器的规格。控制器一旦选定，要想改变与其相关联的开发环境会很困难，所以要使用具有扩展功能的控制器。图 10.65 是 Brains 公司生产的 mmEye-M 控制器，具有 2ch 的 Web 照相机的服务器功能和 IEEE 802.11b 的无线 LAN 功能，上面装备有 RS-485 串行通信和 8ch 的 A-D 输入。这种控制器是为 ROBOTIS 公司的伺服电机 DX-116 而开发的。DX-116 能够通过 RS-485 的数字链传递信号，所以，电机上只接 2 根电源线和 2 根信号线，使关节等重要部分的配线非常牢固，见图 10.66。

表 10.7 控制器的规格

零、部件	规格尺寸
CPU	SH-4 (200MHz)
PS-232C	2 ch
100 BASE-Tx	1 ch
A/D 输入	8 ch
视频输入 NTSC	2 ch
RS-485	2 ch
RAM	64MB
CF 槽	2 ch

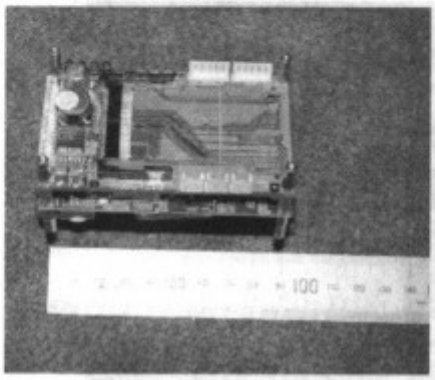


图 10.65 Brains 公司生产的小型、轻量化的控制器

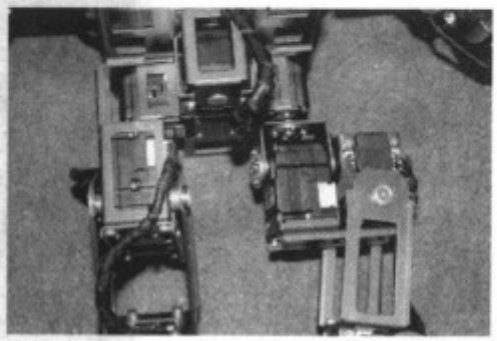


图 10.66 非常牢固的配线得益于利用 RS-485 的数字链

传感器

机器人用的传感器有为了掌握其内部情况而设的内部传感器和认识外部环境而设的外部传感器。ROBO-ONE 的内部传感器是为了稳定机器人姿态而设置，有使用能够探测本体倾角的倾角传感器和陀螺传感器。

Petit 用的内部传感器是 2ch 的检测重力加速度的传感器，采用 Analog Devices 公司的 ADXL320JCP。通过输出值的积分处理，转换成本体的倾斜角度。另外还安装了陀螺传感器，保证机器人能够朝着目标方向稳定地步行。陀螺传感器是 Murata 的 ENC-03MA，检测本体水平方向的旋转角速度。使用尼克公司的微力加载检测足反力，是 3 轴的力传感器，能够测出体重落在足底的哪个部位。

对于两足步行的机器人，由于步行的自体对传感器有干扰，所以必须要充分检查传感器的安装位置、安装方法及信号处理等。

控制方式

为了生成科幻机器人的基本动作，要通过正运动分析和逆运动分析，计算出需要的关节角度，按计算出的关节角度进行控制。但是，我们的系统是分别选择运动关节和非运动关节通过动作编辑直接输入需要进行运动的关节。即：使用工业机器人用的直接示教，实现实际动作的示教再现。由直接示教得到的数据，可以在动作编辑器上自由改动或与其他动作组合。图 10.67 所示为动作编辑。

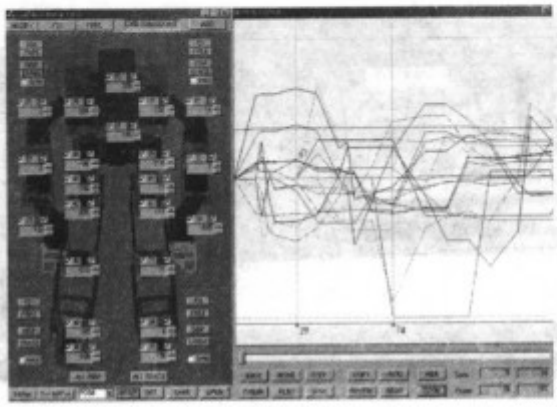


图 10.67　动作编辑(在左边选定动作电机,右边的画面是编辑用的)

运动功能

ROBO-ONE 是一种格斗竞技,所以要求机器人具有攻击技能和防守姿势等特殊动作和相应的运动功能。格斗是"相互"的,这一点非常重要。机器人在格斗时,需要将对手机器人的运动功能(前进和后退的速度、侧行、旋转及转动等)及其动作范围、步长等与自己的进行比较,使自己能够在有利的条件之下进行争斗。

典型的攻击技能有拳击(直击、钩击)、踢(前踢、扫踢)和翻身踢出双脚。防守姿态有压低身形弯腰、移动步法撤退、躲闪等行动。这些运动都是操作员——人的判断,由于机器人需要通过控制器进行操作,所以,多少都要有一些延迟。另外,有时会在一个动作还没有结束时就启动了下一个动作,造成机器人摔倒的后果,所以,需要对每一个动作指令和运动的时间等进行磨合。

图 10.68 和图 10.69 是进行后翻时踢两脚、卧位翻身的动作。这些动作要作为一个动作指令单位,在中途不得中断。

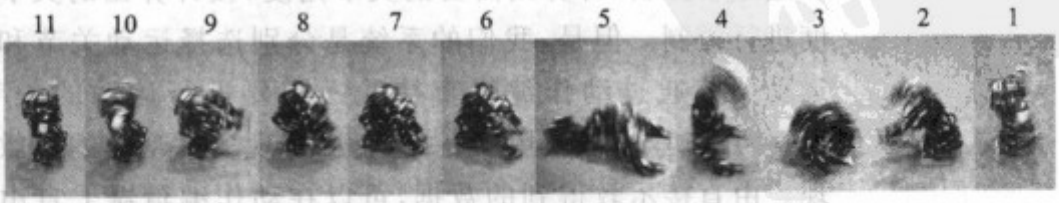


图 10.68　后翻时踢两脚

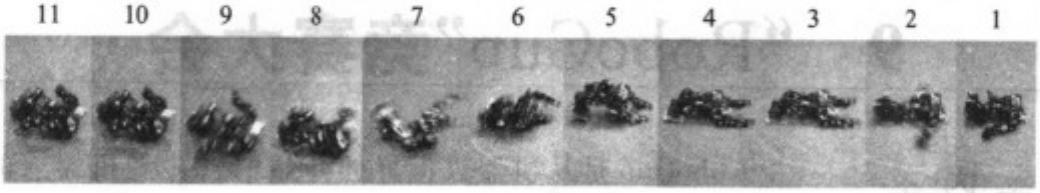


图 10.69 卧位翻身

参加竞赛

设计研究

我校有学生自主的研究活动“**设计研究**”，研究开发科幻机器人是“设计研究”的一个环节。作为自主的研究活动，对研究的目的和技术程度等都不作具体规定，承担者自己满意了就可以结束。将参加 ROBO-ONE 竞赛，作为对试制系统的客观性能评价的方法之一。ROBO-ONE 竞赛的特点是课题要有前瞻性，如果开发的系统在半年或 1 年后不是全新的，就有可能不能够通过竞赛的预选，所以要不断地研究开发。这就要求在短时间内学习主要技术，选择能够将其实际应用的教学课题。本节只是其成果的一部分。

机器人制作者

指导教师：小柳荣次（工程部机器人工程专业教授）

学生：竹中宽幸，汤本修三，葛城皓太（工程部智能机械专业 2、3 年级）

（桐荫横滨大学）

9　“RoboCup”竞赛大会

竞赛内容

RoboCup

RoboCup是从机器人世界杯开始的自律型机器人的国际项目。最初是机器人研究者和人工智能研究者为取代计算机检查而进行研究的课题。目标是“到2050年，机器人世界杯的优胜队将战胜人类世界杯的优胜队”，并为此进行技术开发，即**RoboCup**大会是发表研究开发成果的场所。特别是在国际大会上，参赛队不仅是参加竞赛，还必须写出参赛队介绍的报告(TDP：Team Descrption Paper)(不包括后面提到的少年机器人杯)，另外，还要推荐到与国际大会同时召开的学术研讨会上用英文发表。

救护机器人杯
少年机器人杯
足球机器人杯

最初RoboCup只有足球比赛，后来逐渐发展，有了与救助机器人有关的“**救护机器人杯**”，以中小学生为主的初学者的“**少年机器人杯**”，因此，足球比赛就被称为“**足球机器人杯**”。日本国内大会每年都举办，有Japan opening(或春季竞赛会)、US opening、German opening等。国际大会仍然是每年举办一次，原则上是在有世界杯和奥林匹克的年份在主办国召开，其他的年份则在其他国家召开。表10.8是历届RoboCup大会简介。RoboCup不仅有实物机器人团体，也有机器人仿真团体。按照机器人的尺寸和功能进行分类，制定了各团体的规则。团体数量逐年增加，2005年已经达到表10.9所示的规模，详情请参照RoboCup正式网址htty://www.robocup.org/。

表10.8　历届RoboCup大会

举办的年份	国内大会	国际大会
1997年	(无)	名古屋(日本，10个国家40个参赛队)
1998年	东京	巴黎(法国，20个国家63个参赛队)
1999年	名古屋	斯德哥尔摩(瑞典，35个国家120个参赛队)
2000年	函馆	墨尔本(澳大利亚，19个国家110个参赛队)
2001年	福冈	西雅图(美国，22个国家119个参赛队)

续表 10.8

举办的年份	国内大会	国际大会
2002 年	东京	福冈·釜山(日本·韩国,29 个国家 188 个参赛队)
2003 年	新潟	Padova(意大利,34 个国家 277 个参赛队)
2004 年	大阪	里斯本(葡萄牙[1],37 个国家 346 个参赛队)
2005 年	金泽[2]	大阪(日本,31 个国家 330 个参赛队)
2006 年	北九州(预定)	不来梅(德国,预定)

1)是雅典奥林匹克年,但却在欧洲足球 Euro2004 的举办国葡萄牙召开。

2)2005 年由各团体分别举办,中型机器人在金泽召开。

(统计信息引自机器人杯手册)

表 10.9 RoboCup 的团体

足球机器人杯	小型机器人团体 中型机器人团体 科幻机器人团体 机器人仿真团体
救助机器人杯	救助机器人团体 救助机器人仿真团体
少年机器人杯	挑战足球机器人 挑战舞蹈机器人 挑战救助机器人

我们是在 1997 年从参加首届大会开始加入足球机器人杯的中型机器人团体。开始时,由宇都宫大学(Utsunomiya)、东洋大学(Toyo)和理化学研究所(RIKEN)联合(united)组成了 UTTORI United 队参加竞赛。从 2003 年开始,东洋大学就自己组织了 The Orient 队参加竞赛。国际大会因费用的问题没能够参加,国内大会每年都参加。到 2005 年春季为止,我们取得的最好成绩是国内比赛的第 2 名,国际比赛的第 4 名。对没有能够得到冠军感到非常遗憾。

中型机器人团体以足球机器人杯为主,因为是足球比赛,所以团体赛的名次是由得分、得分与扣分的差值及总分决定。比赛时间为前半场 10min,休息 10min,后半场 10min(也许今后的比赛时间会延长)。比赛时,由 4~6 台机器人

组成一个队，每台机器人的占地面积约为 40cm×40cm(根据各队机器人的总占地面积决定能够参加比赛的最多的台数。但是，在比赛之前要保证竞争的两个队的参赛台数之差为 1)。场地大小目前是 12m×8m(有逐渐增大的趋势)，使用画有白线的绿色地毯。场地的四角处设置了位置识别用的立柱，球门的一侧为黄色，另一侧为蓝色。球的颜色为橙色。

机器人的颜色为黑色，贴有识别各队的标志带(浅蓝色和紫色)，上面有机器人编号。机器人上都有计算机、照相机、电池、无线 LAN、移动机构和踢球机构，由安装的照相机、无线 LAN 获取信息，通过自己的计算机判断来驱动移动机构。对移动机构没有特殊的限制，但到现在为止，各队都是采用车轮机构。

另外，在用照相机识别物体时，识别物体需要一些时间计算，而识别颜色就比较方便，所以，有时会人为地改变机器人、球和场地的颜色。但是，要想在变化莫测的照明条件下准确地识别颜色，在技术上有一定困难，各队也正为此困扰。尽管如此，使机器人能够在室内室外自由活动也是目前必须解决的课题。

我们的机器人

我们的机器人的外观如图 10.70 所示。

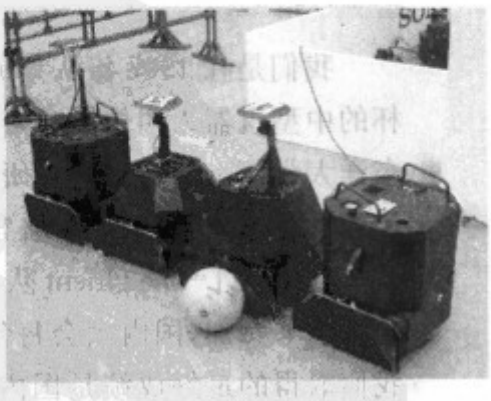


图 10.70 机器人的外观

要制作自律型机器人，则不仅是车轮机构，还包括图像处理和智能判别处理、通过无线 LAN 的通信等技术要素，在此只选取与机电一体化有关的部分，以我们机器人的特点——**全方位移动机构**为主进行说明。全方位移动机构是

全方位移动机构

UTTORI United 创建以来积累的技术的继承，下文揭示了全方位移动机构的变化。为了使读者更好地理解移动机构，还选取了从机器人车体下部拍摄的照片。另外，Rook、Mamiya、Jupiter、Ariel 都是对机器人的爱称。

Rook 的车轮机构

3 自由度独立驱动机构

它被称为 **3 自由度独立驱动机构**，虽然是 4 个车轮，但是却使用 3 个电机能够独立控制，从而实现平面 3 自由度的车轮机构，如图 10.71 所示。车轮是在轮缘上安装了滚柱的特殊车轮。在图 10.71 所示的中央部分是传递运动机构，使用了圆锥齿轮、差动齿轮装置、谐波传动装置等。这个机构是理化学研究所和东洋大学的共同专利。

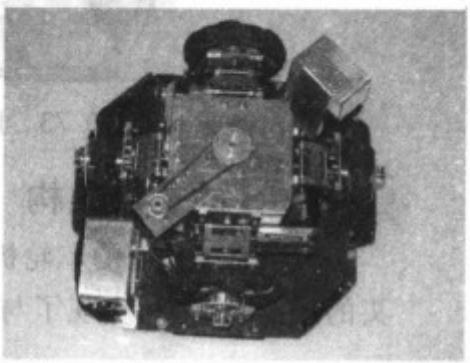


图 10.71 Rook 的车轮机构

Mamiya 的车轮机构

这是 4 个车轮分别用电机驱动控制的简单机构，如图 10.72 所示。与 Rook 相同，使用特殊车轮，横向和纵向的驱动性能优于 Jupiter。在图 10.72 中央的是踢球用的储气罐，为了把它安装到车体的下部费了不少周折。

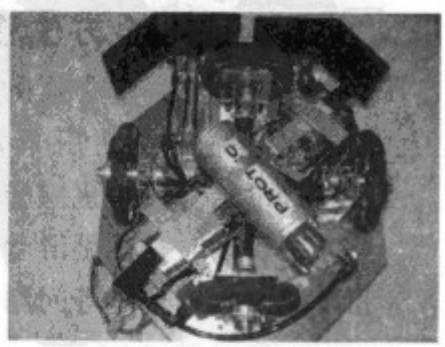


图 10.72 Mamiya 的车轮机构

Jupiter 的车轮机构

这是 3 个车轮分别用电机驱动控制的简单机构，如图 10.73 所示。将车轮改成购买的成品万向轮，实现了车体的小型化和轻量化。但是，因为行走时所有的车轮驱动都是滑动，容易受地面摩擦因数的影响，所以，使行进路线控制困难。

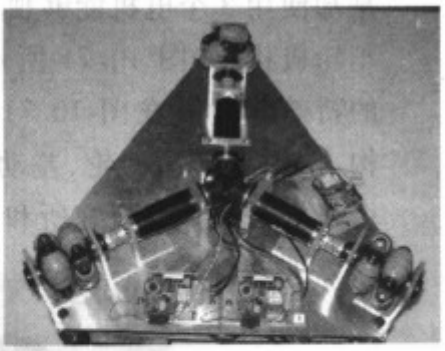


图 10.73　Jupiter 的车轮机构

Ariel 的车轮机构

它与 Mamiya 的车轮机构相同，但是车轮由自制改成购买的成品万向轮，实现了与 Jupiter 相同的小型化和轻量化。

与制作相关的事项

下面将我们的经验简单地介绍给读者，仅供参考。

关于车轮

需要全方位移动时，不能够使用普通的车轮，而必须使用如上所述的特殊车轮。这时，在行走的平面性上使用 3 个轮比较好。使用 4 个轮的行走直线性稳定，但是，多了一个电机和传递运动的机构，不仅是多占了空间，还使费用和耗电量增加，这也是不能够忽视的问题。

是否需要全方位移动

理论上不一定必须使用全方位移动机构，但是，实际上在计划线路点上使用全方位移动机构比较简单，并且在 RoboCup 的应用中也感受到了全方位移动的优越性。由于全方位移动时常常是滑动，存在能量损耗大、地面的平面度和摩擦因数不确定等问题，所以使用时需要给予注意。

减速机的使用及减速比的确定

输出转矩因电机而异，由于必须使用小型电机，所以通常采用高转速电机大减速比的方法获得转矩。减速器一般使用行星齿轮、谐波传动和带传动。因为参加 RoboCup 竞赛的机器人之间有碰撞，所以应防止车轮所受的力传递给电机，可以通过加入带传动的环节来解决。

是否要采用车轮吊架

在地面的平面度没有保障时使用车轮吊架比较有利，这是常识，但我们还有其他的经验。采用吊架时需要用万向联轴器，因为是万向联轴器，车轮不仅可以上、下运动也可以左、右运动，所以，有时就会损坏谐波减速器。因此，对常识也要分析使用。

用计算机控制电机时的接口选择

通过计算机驱动直流电机时，接口的原始构成是 D/A 转换器、A/D 转换器和计数器。因为需要有接口插板，所以，单片机或台式机的主板均可直接使用。在计算机和电机之间大多使用电机驱动电路进行速度反馈。因为也有将计数器的输出进行 f/U 转换，具有与测速输出等效功能的驱动器，所以，只使用编码器的小型电机比较方便。另外，最近也能够购买到非插件型的，通过 USB 口与外部设备连接的产品，其特点是处理电缆容易和可靠性高。特别希望今后能够在机器人上安装笔记本电脑。

参加竞赛

与面向高中生的竞赛不同，RoboCup 竞赛时制作的机器人是有研究价值的，技术水平高，但费用也高。特别是需要通过处理视频图像确定机器人自身的行动时，要花费一大笔资金。开始时，大约需要 300 万日元以上，最近降到了 100 万日元。这得益于计算机和照相机技术的革新。

参加活动的学生想在 RoboCup 中出线的动机，主要是想在毕业设计或研究生的研究阶段取得好的成绩。坚强的意志和不断的努力必定结出丰硕的果实。最近，想参加 RoboCup 的新生有不断增加的趋势。

机器人的制作者

历经多年仅有的几台机器人是许多人设计制作的结晶，有宇都宫大学的横田先生、尾崎先生及其毕业生、理化学研究所的浅间先生（现东京大学）、嘉悦先生、川瑞先生、铃木先生（现东京电机大学），以及东洋大学的松元（笔者）及其毕业生，这是他们的热情和努力所赐。历届参与 RoboCup 的学生有 30 多人，遗憾的是因篇幅有限不能够将所有的名字全部列出。

下面是我们队的网址。

htty://robot. eng. toyo. ac. jp/robolab/robocup/Orient/index-j. html

（东洋大学工程部）

索 引

数字及英文字母词汇

1位 …… 79
3自由度独立驱动机构 …… 557
A/D(模拟/数字)转换器 …… 9
A/D转换 …… 96,310
AC螺线管 …… 223
ALU …… 298
API …… 423
ARCNET …… 424
BASIC语言 …… 104
CAD制图 …… 40
CCD型固体图像传感器 …… 171
CPLD …… 92
CPU …… 298
CTR型热敏电阻 …… 201
C语言 …… 104,525
D/A(数字/模拟)转换器 …… 9
D/A转换 …… 96
DC螺线管 …… 223
dilation图像 …… 478
DP选配 …… 216
DSP …… 216
D-H参数 …… 401
EEPROM …… 307
EIA …… 424
EIA-232(RS-232C) …… 108
FA线路 …… 241
FCC …… 424
FG …… 247
FG伺服控制 …… 247
flash ROM …… 307
flash存储器(FL)类型 …… 314
FMEA …… 454
FM-CW(频率调制-连续波)式 …… 185
FORTRAN语言 …… 104
FPGA …… 92
FTA …… 454
GUI …… 334
H桥电机驱动器 …… 462
H桥方式 …… 255
IC温度传感器 …… 204
IEEE1284 …… 107
IGVC …… 469
IPM …… 414
J-FET …… 73
LAN …… 109
MIL标准 …… 80
MIL符号 …… 80
MOS-FET …… 73
NC机床 …… 529
NTC型热敏电阻 …… 201
n型半导体 …… 72
ON-OFF控制 …… 241
PA程序库 …… 419,420
pH玻璃电极 …… 212
PID反馈控制 …… 464
PSD …… 187
PSD传感器 …… 525
PTC型热敏电阻 …… 201
PWM发生器 …… 251
PWM控制方式 …… 245,246
p型半导体 …… 72
RAM …… 307
ROBOCON …… 539
RoboCup …… 554
ROBO-ONE on PC …… 546
ROBO-ONE Special …… 546
ROBO-ONE …… 546
ROBO-ONE竞赛 …… 546
ROM …… 307

RS-485 …… 424
SCARA …… 392
SF 卡 …… 487
SF 卡处理部分 …… 490
SIMD 型电路 …… 477
USB …… 108
Verilog HDL …… 92
VHDL …… 92
V 带轮 …… 147
ZMP …… 464

汉字词汇

A

安培回路定律 …… 61
安培右手螺旋定则 …… 61
安全措施 …… 454
安全分析 …… 433
安全系数 …… 24
安全性 …… 433
安全制动器 …… 136
安全装置 …… 436

B

白金测温电阻 …… 202
摆动 …… 113
摆动马达 …… 266
摆动式气动执行装置 …… 278
摆杆式 …… 169
半闭环控制 …… 448
半导体材料 …… 196
半导体磁敏传感器 …… 196
半导体磁敏电阻 …… 196
半导体磁阻元件 …… 166
半导体存储器 …… 307
半导体霍尔元件 …… 196
半导体角度传感器 …… 166
半导体气敏传感器 …… 210,219
半导体位置检测元件 …… 165
半导体压力传感器 …… 161
半桥方式 …… 254
饱和段 …… 255
饱和水蒸气压 …… 207
饱和状态 …… 246
保安服务 …… 466
保持型继电器 …… 376
保持型主令开关 …… 375
保持转矩 …… 226
被控对象 …… 47,355
被控量 …… 355
本征半导体 …… 47,49,72
比例电流伺服控制 …… 247
比例极限 …… 23
毕奥-萨伐尔定律 …… 61
毕业设计 …… 500,507
闭环反馈系统 …… 412
闭环控制方式 …… 239,247
闭环控制系统 …… 448
编辑器 …… 105
编码器的偏置 …… 430
变址寄存器 …… 300
标志 …… 304
标志寄存器 …… 299
标准公差 …… 39
标准接线 …… 228
并行 SCSI …… 108
并行传输方式 …… 107
伯德图稳定性评价法 …… 53
不饱和区 …… 245
不挥发存储器 …… 91
不一致电路 …… 81
布尔代数 …… 56,82
步进电机 …… 222,225,525

C

残留危险 …… 434
操作功能 …… 391
操作规程 …… 436
操作码 …… 303
操作数 …… 303
操作系统 …… 333
操作性 …… 459
侧投影 …… 35
测力计 …… 160
测温电阻 …… 202
插补控制 …… 448
颤动 …… 101
常闭方式 …… 136
常闭型 …… 487
常开型 …… 487
超调量 …… 52
超级视觉芯片结构程序 …… 477
超声波电机 …… 258
超声波距离传感器 …… 185,468
超声波式 …… 169
超小型机械 …… 12
程序计数器 …… 300,302
程序控制 …… 45
程序输入设备 …… 314
程序语言 …… 103
尺寸公差 …… 39
齿轮 …… 138
齿条齿轮式 …… 283
出票和剪票系统 …… 484
触发器 …… 83
传递函数 …… 52
传感器 …… 4,44,294
传感器组合 …… 11
传送部分 …… 486
串联电阻 …… 236
串行 SCSI(IEEE1394) …… 108
串行传输方式 …… 107
创新比赛 …… 539
磁导率 …… 62
磁感应 …… 61
磁感应式 …… 169
磁敏元件 …… 197
磁通密度 …… 62,366
磁性齿轮 …… 166
磁滞特性 …… 88
从动件 …… 148
存储的电荷量 …… 64
存储器 …… 298

D

达林顿方式 …… 256
达林顿连接 …… 234
打孔部分 …… 490
大功率晶体管 …… 230,232,242
代数方程式 …… 347
单词音波 …… 215
单词音波形选配方式 …… 215
单电源方式 …… 254
单独动作 …… 464
单极晶体管 …… 73
单极驱动电路 …… 228
单极型驱动方式 …… 229
单片 IC …… 90
单输入/单输出系统 …… 345
单位脉冲 …… 362
单位脉冲函数 …… 361
单稳态触发器 …… 232
单线螺纹 …… 116
单元方框 …… 356
弹簧 …… 122
弹性极限 …… 23
弹性力 …… 122

弹性体 …… 259
挡板 …… 371
导程 …… 116
导电塑料 …… 164
导电性流体 …… 178
等效电容量 …… 64
低温脆性 …… 26
低温型 …… 202
地址 …… 95
地址总线 …… 298
第三角投影法 …… 35
第一角投影法 …… 35
点对点 …… 109
电波发射式 …… 169
电磁 …… 6
电磁阀 …… 260
电磁感应 …… 178
电磁感应型磁敏传感器 …… 198
电磁离合器 …… 30
电磁力 …… 61
电磁式流速传感器 …… 178
电磁铁 …… 260
电磁制动器 …… 136
电导率的变化 …… 210
电动机 …… 8
电感 …… 63
电荷 …… 58
电机 …… 6
电机的惯性矩 …… 368
电机的旋转角度 …… 344
电机轴上的惯性矩 …… 447
电力电子技术 …… 8
电流控制器 …… 413
电流驱动 …… 242
电气时间常数 …… 369
电容 …… 64,181
电容感应式 …… 169,170
电枢 …… 366
电枢电压 …… 366
电刷 …… 239,366
电位器 …… 462
电压驱动 …… 242
电源 …… 6
电子 …… 2
电阻控制方式 …… 245
电阻体 …… 163
调节时间 …… 52
调制速度 …… 107
叠加原理 …… 362
定滑轮 …… 19
定理 …… 82
定时器 …… 56
定位部分 …… 488
定位机构 …… 489
定位精度 …… 144
定值控制 …… 45
定子 …… 239
动滑轮 …… 19
动力源 …… 8
动态加速度 …… 181
动特性 …… 51
动载荷 …… 21
动作用电磁线圈 …… 376
读取部分 …… 489
短路制动 …… 255
堆栈指针 …… 300
多变量系统 …… 49
多个力的合成 …… 17
多关节机器人 …… 114,146,391
多圈型 …… 164
多输入/多输出系统 …… 344
多数载流子 …… 72
多线螺纹 …… 116
多谐振荡器 …… 232

E

二阶延迟 …… 52
二阶延迟系统 …… 352
二力的合成 …… 17
二值信号 …… 55

F

发光元件 …… 165
发射极 …… 73
阀芯 …… 48
阀座 …… 48
法拉第磁光效应 …… 198
法拉第电磁感应定律 …… 63,198
翻转部分 …… 489
翻转机构 …… 490
反电动势 …… 240
反电动势常数 …… 367
反馈 …… 44
反馈闭环系统 …… 274
反馈的等效变换 …… 356
反馈环节 …… 355
反馈控制 …… 44,225
反馈量 …… 49
反相器 …… 81
反相状态描述符 …… 81
方框并联 …… 356
方框串联 …… 356
方框图简化 …… 357
防爆电机 …… 264
防火墙 …… 110
防止接触装置 …… 436
仿形加工装置 …… 48
访问时间 …… 307
放出口 …… 490
非特定说话人方式 …… 215
非同步传输方式 …… 107
非线性系统 …… 49
分辨率 …… 9
分离部分 …… 488
分离机构 …… 488
分路点 …… 356
分母多项式 …… 352
分压器 …… 256
峰-峰值 …… 67
弗莱明右手定则 …… 62
弗莱明左手定则 …… 61,366
服务器 …… 109
辅助存储器 …… 306
辅助装置(附件) …… 287
负反馈控制 …… 236
负载电阻 …… 87
负载转矩 …… 226,368
附属设备 …… 269
"非"(NOT)电路 …… 380

G

干扰 …… 45,51
感抗 …… 68
感应电动势 …… 63
感应电压 …… 63
缸体 …… 373
高磁导率铁氧体 …… 198
高分子薄膜吸湿材料 …… 207
高级语言 …… 104
高频振荡式 …… 169
高输入阻抗的差动放大器 …… 164
高速目标跟踪系统 …… 475
高位开关 …… 257
高温型 …… 202
高阻状态 …… 88
个人机器人 …… 492
跟踪控制 …… 45

工业机器人 …… 390
工作油缸 …… 48
公理 …… 82
功 …… 19
功率 …… 19
功率 MOSFET …… 230,232
功率损耗 …… 246
共发射极电路 …… 242
共振频率 …… 70
构件 …… 31
固定节流 …… 288
固体传感器 …… 171
固体电解质氧气传感器 …… 209
固有振荡频率 …… 372
故障检查 …… 436
关节角度 …… 397
光电倍增管 …… 190
光电池 …… 191
光电导效应 …… 190
光电导型 …… 190
光电导型传感器 …… 190
光电管 …… 190
光电面 …… 190
光电式 …… 169
光电式角度传感器 …… 165
光电效应型 …… 190
光电旋转编码器 …… 175
光电子 …… 190
光电子释放型 …… 190
光控继电器 …… 191
光敏传感器 …… 525
光敏二极管 …… 191
光敏距离传感器 …… 468
光敏三极管 …… 192
光生伏特效应 …… 191
光生伏特型 …… 190,191
光通信系统 …… 192
光纤式 …… 170
光学材料 …… 198
光栅尺 …… 174
硅 …… 196
滚动导轨 …… 133
滚珠丝杠 …… 120
滚子链 …… 30,144,146
过渡响应 …… 52
过渡状态 …… 51
过盈 …… 40
过盈配合 …… 40

H

海洋领域 …… 442
耗尽型 …… 74
赫维茨稳定判别 …… 363
恒弹性金属镍铬合金 …… 176
恒电流斩波驱动 IC …… 237
恒压(齐纳)二极管 …… 73
横向应变 …… 22
红外分光计 …… 191
红外线分布图像 …… 191
红外线温度传感器 …… 204
后运转性能 …… 461
胡克定律 …… 122
互补型晶体三极管 …… 255
滑块 …… 163
滑块机构 …… 150
缓冲阀 …… 288
换向控制 …… 266
换向器 …… 239,366
挥发性存储器 …… 91
恢复型继电器 …… 376,385
恢复型开关 …… 385
恢复型主令开关 …… 375
恢复用电磁线圈 …… 376
回转 …… 535
汇编程序 …… 103

汇编语言 …… 525
惠斯通电桥电路 …… 158
混合 IC …… 90
活动视觉 …… 475
活塞 …… 48
活塞泵 …… 373
活塞式 …… 282
伙伴型机器人 …… 492
霍尔效应 …… 196
霍尔元件 …… 264
"或"(OR)电路 …… 379
"或非"(NOR)电路 …… 380

J

机构 …… 14
机构创意竞赛 …… 512
机架 …… 149
机器人控制器 …… 344
机器人樱桃竞赛 …… 512
机身部分 …… 486
机械 …… 2,390
机械部分 …… 415
机械接触部分 …… 263
机械界面坐标系 …… 396
机械时间常数 …… 369
机械图样 …… 36
积分环节 …… 359
基本软件 …… 104
基尔霍夫定律 …… 58
基极 …… 73
基准坐标系 …… 395,396
极限强度 …… 23
极坐标系机器人 …… 113
集成电路 …… 90
集电极 …… 73
集票部分 …… 490
集中处理部分 …… 490
集中载荷梁 …… 26
几何误差 …… 430
计数器/定时器用 LSI …… 252
计数器 …… 85
计算机 …… 4,390
继电器 …… 241,375
寄存器 …… 85
寄生二极管 …… 257
加、减速控制 …… 448
家庭自动化 …… 443
间接传动 …… 148
间隙 …… 40,459
间隙配合 …… 40
检测 …… 2
检测开关 …… 375
检测装置 …… 47
剪切弹性模量 …… 24
剪切角 …… 22
剪切应变 …… 22
剪切载荷 …… 21
简支梁 …… 26
交流(AC)伺服电机 …… 263
交流电机 …… 222
焦耳热 …… 246
角度精度高 …… 227
角速度 …… 68,344
阶跃响应 …… 52
接触器 …… 241
接触燃烧式气敏传感器 …… 209
接口 …… 96
接口电路 …… 101
节流阀 …… 288
节流孔 …… 371
结束信号 …… 45
解码 …… 302
介电常数 …… 64
借位 …… 304
金属电阻丝 …… 164

金属应变片 …… 158,181
进位 …… 304
精度 …… 9
警备机器人 …… 465
警备系统 …… 466
径向活塞式 …… 270
径向活塞式气动马达 …… 282
径向活塞式液压马达 …… 270
静电容量 …… 64
静态加速度 …… 181
静态误差 …… 52
静特性 …… 51
静载荷 …… 21
救护机器人杯 …… 554
就地旋转 …… 535
距离 …… 528
聚光元件 …… 187
绝对精度 …… 428
绝对湿度 …… 206
绝对湿度传感器 …… 206
绝对位置精度 …… 428
绝对型 …… 175
绝对型旋转编码器 …… 176
绝对姿态精度 …… 428
绝缘 …… 241
均布载荷梁 …… 26

K

开关 …… 375
开关控制型 …… 255
开环控制 …… 412,448
科里奥利力 …… 176
可编程序控制器 …… 241
可变电位器 …… 163
可操作性 …… 459
客户 …… 109
空间凸轮 …… 31
空气质量调整装置(F. R. L 组件) …… 287
控制 …… 2
控制部分 …… 302,486
控制处理部分 …… 414
控制阀 …… 269
控制结束 …… 45
控制量 …… 49,355
控制器 …… 47,355
控制信号 …… 4
控制用继电器 …… 376
控制装置(空气阀门) …… 287
控制装置 …… 298
控制总线 …… 298

L

拉普拉斯变换 …… 347
拉普拉斯变换表 …… 347
拉普拉斯逆变换 …… 347
拉普拉斯算子 …… 347
拉伸载荷 …… 21
累加器 …… 299
楞次定律 …… 63
离散化处理 …… 218
离线模拟 …… 428
离子敏场效应晶体管 …… 212
离子敏传感器 …… 212
离子选择电极 …… 212
理想机器人模型 …… 430
力(或力矩)放大机 …… 141
力的分解 …… 17
力矩 …… 18
力矩电动机 …… 274,370
励磁模式 …… 232
连杆(中间件) …… 149
连杆机构 …… 150
连续梁 …… 26
量子型 …… 204

临界任务系统 …… 337
零生产方式 …… 437
流程图 …… 97
流量 …… 274
流量控制 …… 266
流量控制阀 …… 44
六维测量仪 …… 430
漏极 …… 73
滤波部分 …… 412
轮询方式 …… 339
逻辑"非" …… 379
逻辑"非"电路 …… 81
逻辑"或" …… 379
逻辑"或"电路 …… 80
逻辑"异"电路 …… 81
逻辑"与" …… 379
逻辑"与"电路 …… 80
逻辑表达式 …… 82
逻辑代数 …… 82,382
螺距 …… 116
螺线管 …… 260
螺旋副 …… 14
螺旋升角 …… 116
螺旋线 …… 116

M

脉冲编码器 …… 48
脉冲分配电路 …… 232
脉冲回波式 …… 185
脉冲控制方式 …… 246
脉冲宽度调制电路 …… 102
脉冲频率 …… 226
脉冲响应 …… 362
酶传感器 …… 213
酶电极 …… 213
迷宫探测计算 …… 533
免维护 …… 521
免疫传感器 …… 213
命令读出阶段 …… 96
命令循环 …… 96
命令执行阶段 …… 96
模仿人类五官 …… 218
模拟电压 …… 528
模拟式光敏传感器 …… 534
模拟信号 …… 9
摩擦负载转矩 …… 447
摩擦角 …… 117
摩擦离合器 …… 30
摩擦力 …… 30
摩擦制动器 …… 31
目标程序 …… 103
目标坐标系 …… 395

N

奈奎斯特稳定判别法 …… 53
内部中断 …… 338
内存 …… 95
内核 …… 340
能耗制动 …… 241
逆变器 …… 264
逆运动学 …… 397,457
镍氢电池 …… 463
扭矩 …… 27
扭矩传感器 …… 160
扭转 …… 27
扭转角 …… 28
农业 …… 440

O

欧姆定律 …… 58

P

配合 …… 40

配置寄存器 …… 324
配置设计 …… 459
喷嘴挡板阀 …… 370,371
疲劳极限 …… 24
疲劳破坏 …… 24
偏差 …… 47,355
频率响应 …… 53
平面凸轮 …… 31
平行四连杆机构 …… 150
评价函数 …… 49
坡莫合金 …… 197
剖视图 …… 37

Q

齐次变换矩阵 …… 403
气动马达 …… 278,282
气动式 …… 169,176
气动执行装置 …… 8
气体浓度 …… 209
气味传感器 …… 213
气压发生装置 …… 287
气压马达 …… 223
气压源 …… 6
汽缸 …… 223,278
启动信号 …… 44
启动指令 …… 44
启动转矩 …… 226,239,240
起重机 …… 144
牵出转矩 …… 226
牵入转矩 …… 226
嵌入式系统 …… 294,333
桥式伺服控制 …… 247
切应力 …… 21
求和点 …… 356
球形 …… 201
曲柄滑块机构 …… 150,152
驱动部分 …… 415
驱动级三极管 …… 256
驱动器 …… 47
驱动装置(执行装置) …… 287
屈服(齐纳)现象 …… 73
屈服点 …… 23
取出 …… 302
取指令 …… 302
全方位移动机构 …… 556
全国高等职业学校机器人竞赛 …… 539
全景照相机 …… 470
全桥方式 …… 255
全日本微机遥控迷途通过竞赛 …… 505

R

热成像 …… 191
热电动势 …… 203
热电流 …… 203
热电偶 …… 203
热电效应 …… 204
热电型传感器 …… 204
热敏电阻 …… 201
热能型 …… 204
热转换型 …… 190
人工智能 …… 11
人机接口 …… 423
人体形自动机械 …… 390
人形机器人 …… 457
人造的人 …… 390
任务调度功能 …… 340
任务控制块 …… 338
日本职业学校机器人竞赛 …… 524
冗余轴 …… 419
容抗 …… 68
柔量 …… 430
柔性化 …… 2
柔性控制 …… 461
蠕变 …… 26

软件 …… 4,10
软件门 …… 487

S

塞贝克效应 …… 203
三态门 …… 88
上下文 …… 338
上下文开关 …… 340
少年机器人杯 …… 554
设定值 …… 44,47,51,355
设计研究 …… 553
射极跟随器(共集电极)电路 …… 242
摄像管 …… 171
生成励磁模式 IC 芯片 …… 234
生物传感器 …… 213
失步 …… 227,528
施密特反相器 …… 88
十六进制数 …… 79
时间共享方式 …… 339
时间继电器 …… 375,377
时间控制 …… 56
时间片 …… 339
时间图 …… 82
时间中断 …… 338
时序图 …… 56
实时 OS …… 333
实时系统 …… 333
实质性的安全设计 …… 434
拾音线圈 …… 198
示教修正 …… 428
世界坐标系 …… 396
事件 …… 336
视觉 …… 219
视觉智能传感器 …… 219
手动操作开关 …… 375
手动输入 …… 97
寿命 …… 239
输出端口 …… 298
输出负载数 …… 87
输出选通功能端 …… 235
输入/输出接口 …… 96
输入端口 …… 298
输入阻抗 …… 256
数据存储器 …… 316
数据总线 …… 298
数学建模 …… 344
数字式光敏传感器 …… 533
数字信号 …… 9
衰减振荡 …… 227
双保险 …… 454
双电源方式 …… 254
双端固定梁 …… 26
双极驱动电路 …… 228
双极型驱动方式 …… 229
双向螺旋机构 …… 120
水平多关节机器人 …… 391
水平投影 …… 35
水蒸气压 …… 207
瞬时值 …… 67
瞬态响应 …… 51
死区 …… 255
四连杆机构 …… 148
四轮驱动 …… 501,527
伺服 …… 390
伺服阀 …… 370
伺服放大部分 …… 414
伺服驱动部分 …… 414
伺服系统 …… 45,274
伺服装置 …… 222
速度 …… 141
速度控制 …… 239,528
速度控制阀 …… 288
速度控制器 …… 413
随动控制 …… 45

T

碳膜 …… 164
陶瓷电阻 …… 164
陶瓷吸湿材料 …… 207
特别教育 …… 436
特定说话人方式 …… 215
特异点 …… 411
锑化铟 …… 196
天线部分 …… 486
条形 …… 201
铁心位置 …… 260
停止信号 …… 44
通道显示灯 …… 487
通信处理部分 …… 414
通行门 …… 486
通用集成逻辑电路 …… 232
通用寄存器 …… 299
同步传输方式 …… 107
同步带 …… 144
同步带传动 …… 147
同步电流 …… 87
同步离合器 …… 30
投入口 …… 488
图像传感器 …… 171
图像信息 …… 219
图像雅可比 …… 479
推斥力 …… 261
陀螺传感器 …… 176,535
椭圆凸轮 …… 48

W

外部存储器 …… 306
外部设备 …… 95
外部中断 …… 338
外存储器 …… 95
外加电源电压 …… 344
微代码 …… 302
微动开关 …… 375
微动驱动功能 …… 237
微分方程式 …… 347
微机遥控迷途通过 …… 530
微机遥控迷途通过竞赛 …… 530
微生物传感器 …… 213
微细加工技术 …… 11
微型计算机 …… 298
维护 …… 441
位移传感器 …… 47
位置 …… 344,395
位置检测部分 …… 415
位置控制 …… 167,239,344
位置控制器 …… 412
位置姿态 …… 397
味觉传感器 …… 213
文档寄存器 …… 316
文件 …… 97
文氏图 …… 83
稳定性 …… 52
稳定状态 …… 51
稳态偏差 …… 52,357
稳态响应 …… 51
涡流式距离传感器 …… 188
无触点继电器 …… 377
无触点型限位开关 …… 169
无励磁动作型电磁制动器 …… 136
五角形接线 …… 228
误差信号 …… 47

X

吸引的方法 …… 513
吸引力 …… 261
系统模型 …… 344
显示 …… 97

现代控制理论 …… 49
限位开关 …… 168,527
线圈型磁头 …… 198
线绕型 …… 164
线性段 …… 255
线性控制方式 …… 245
线性控制型 …… 255
线性系统 …… 49
相对湿度 …… 206,207
相对湿度阻抗变换式湿度传感器 …… 207
相间电容器 …… 234
相扑机器人 …… 498
相位 …… 68
响应速度 …… 52
响应特性 …… 235
向导机器人 …… 466
向心力 …… 176
小型继电器 …… 241
斜线行走 …… 535
写入部分 …… 490
心形凸轮 …… 152,154
信号速度 …… 107
信息处理 …… 218
信息处理流程图 …… 97
信息显示部分 …… 486
星形接接线 …… 228
行波 …… 259
行程 …… 169,223,260
续流二极管 …… 250,257
嗅觉传感器 …… 219
嗅觉功能 …… 218
悬臂梁 …… 26
旋转编码器 …… 247,264
旋转电机 …… 222
旋转角度 …… 7,48
旋转角速度 …… 7,367
旋转运动 …… 113
旋转轴 …… 391
雪崩式光敏二极管 …… 191
雪崩效应 …… 192
寻线机器人竞赛 …… 505
寻线竞赛 …… 505
寻找机器人竞赛 …… 530
循环动作 …… 464

Y

压电材料 …… 182
压电逆效应 …… 185
压电陶瓷片 …… 176
压电体 …… 258
压电效应 …… 182,185
压电正效应 …… 185
压力控制 …… 266
压缩载荷 …… 21
压阻效应 …… 161,181
雅可比矩阵 …… 409
亚砷化锌 …… 198
阳极 …… 72
氧气浓度 …… 209
氧气压力 …… 209
遥控监视装置 …… 466
遥控型 …… 498
叶片式 …… 270,282,283
液体压力 …… 274
液压缸 …… 223,266
液压马达 …… 223,266
液压油 …… 48
液压源 …… 6,269
液压执行装置 …… 9,269
一次可编程(OTP)类型 …… 314
一阶延迟 …… 52
一阶延迟系统 …… 352
医疗和福利 …… 442
移动副 …… 14
移动功能 …… 391

以太网电缆 …… 110
异常振动 …… 528
溢流 …… 44
阴极 …… 72
引导阀 …… 370
引导滑阀 …… 48
印字部分 …… 490
应变 …… 26,158
应变量 …… 22
应变系数 …… 159
应力-应变曲线 …… 23
应力集中 …… 25
应力-应变曲线 …… 122
应用软件 …… 104
硬件 …… 10
硬件记述语言 …… 105
油压放大器 …… 274
有触点继电器 …… 377
有线遥控 …… 522
有效值 …… 67
右手 …… 398
娱乐 …… 443
宇宙领域 …… 442
语音识别 …… 215
阈电平 …… 86
圆形 …… 201
圆柱坐标系机器人 …… 113
源程序 …… 103
源极 …… 73
远距离操作 …… 499
匀速直线运动 …… 154
运动副 …… 14
运动控制部分 …… 414
运动链 …… 31
运动数据库 …… 464
运动学 …… 397
运算放大器 …… 247
运算装置 …… 298
运行管理 …… 334
"与"(AND)电路 …… 379
"与非"(NAND)电路 …… 380

Z

灾害救助 …… 441
载荷-拉伸变形曲线 …… 23
再生 …… 308
造价 …… 147
噪声 …… 239
噪声裕度 …… 87
增量方式 …… 174
增量型 …… 175
增量型旋转编码器 …… 175
增强型 …… 74
闸门信号 …… 300
栅极 …… 73
占空比 …… 246,250
张紧机构 …… 147
折页式 …… 169
真空发生装置 …… 287
真值表 …… 82,83
振动传感器 …… 181
振动式 …… 176
振动子 …… 180
振幅 …… 67
振子 …… 181
正等轴测图 …… 35
正二等轴测图 …… 35
正三轴测图 …… 35
正投影 …… 35
正弦波交流 …… 67
正应力 …… 21
正运动学 …… 397
执行机构 …… 168
执行指令 …… 302
执行装置 …… 4,47,222,294

直角坐标系机器人 …… 113
直接传动 …… 148
直接接触 …… 30
直流(DC)电机的等效电路 …… 240
直流测速发电机 …… 247
直流电机 …… 222
直流伺服控制 …… 247
直线超声波电机 …… 258
直线电机 …… 222
直线行走 …… 535
直线型执行机构 …… 260
直线运动 …… 113
直线运动轴 …… 391
指令集 …… 303
指令寄存器 …… 299
指令解析部分 …… 299,302
指令值 …… 47,48
制造领域 …… 440
质量-摩擦-弹簧系统 …… 371
智能工程学 …… 11
智能化 …… 2
智能化处理 …… 11
智能化气敏传感器 …… 219
中断 …… 338
中断控制技术 …… 234
中断信号端子 …… 301
中温型 …… 202
中央处理器 …… 95
终端坐标系 …… 396
重心 …… 18
重新写入(更新) …… 91
重症治疗室 …… 452
周期时间 …… 307
轴 …… 27,126
轴承游隙 …… 129
轴承游隙比 …… 129
轴颈 …… 129
轴瓦 …… 129
轴向弹性模量 …… 24
轴向活塞马达 …… 373
轴向应变 …… 22
主动件 …… 148
主机 …… 95
助记符 …… 103
专用寄存器 …… 316
转动副 …… 14
转矩 …… 27,126
转矩常数 …… 367
转速 …… 141
转速传感器 …… 239,247
转向控制 …… 167
转子 …… 239,263
装卸 …… 392
状态变量 …… 49
状态值 …… 45
撞针式 …… 169
姿态 …… 344,395,396
资源管理 …… 334
自动补偿功能 …… 218
自动充电功能 …… 466
自动剪票系统 …… 484
自动开关控制器 …… 191
自动控制 …… 391
自动校正 …… 218
自感电动势 …… 63
自感系数 …… 63
自感现象 …… 63
自律行走 …… 467
自律行走型轮椅机器人 …… 469
自律型 …… 498
自律移动功能 …… 466
自启动区域 …… 226
自适应移动机器人 …… 11
字 …… 79
字节 …… 79
足球机器人杯 …… 554

阻抗 …… 69,236
组合逻辑 …… 55
最大极限尺寸 …… 39
最大值 …… 67
最小定位精度 …… 447
最小极限尺寸 …… 39
左手 …… 398